



**Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**Geometria hidràulica de la vall de
l'Ebre a l'estiatge de 1863**

Autor

Capapé Miralles, Sergi

Tutor

Martín Vide, Juan Pedro

Departament

Marítima, Hidràulica i Ambiental

Intensificació

Enginyeria Hidràulica

Data

2 de juliol de 2010

<<¡Por fin te miro, Ebro famoso,
hoy es más ancho y es más hermoso!
¡Cuánta belleza, cuánta alegría,
cuánto he pensado si te vería!>>

Cor de repatriats.
Sarsuela *Gigantes y Cabezudos*, 1898.

Títol: Geometria hidràulica de la vall de l'Ebre a l'estiatge de 1863

Autor: Sergi Capapé Miralles

Tutor: Juan Pedro Martín Vide

Paraules clau: geometria hidràulica; morfologia fluvial; teoria del règim; rius de grava; base de dades; règim natural; cabal mínim; perímetre mullat; Ebre.

RESUM

Durant l'estiatge del 1863, un equip encapçalat per l'Enginyer de Camins, Canals i Ports Don Pedro Antonio de Mesa Arroquia va encetar una travessia que els duria a completar el primer reconeixement hidrològic de la vall de l'Ebre. Es van practicar 231 aforaments, 129 dels quals van representar-se mitjançant les formes i les dimensions de les àrees mullades pel flux. Com que la pressió antròpica sobre els sistemes fluvials durant el segle XIX era encara insignificant a l'Estat espanyol, es considera que el riu fluïa amb el seu règim natural. A dia d'avui la situació és oposada a les dades d'origen, existint una intensa regulació a la conca. La preservació o la recuperació dels règims naturals dels rius és el *full de ruta* dels principals organismes responsables.

Un riu que circula sobre un terreny al·luvial és un element en constant evolució, tant en planta com alçat, si l'entorn així li ho permet. El cabal Q , el pendent S i la mida del material de la llera d_{50} són variables determinants en la configuració de la geometria hidràulica. La *teoria del règim*, també coneguda com l'estudi de les lleres en condicions d'equilibri, desenvolupa una formulació consistent que permet l'obtenció de les dimensions d'una llera estable, essent de gran utilitat en projectes d'endegament o de protecció dels marges.

El cabal dominant -i no el corresponent a condicions d'estiatge- és un requisit recomanat que no pot assolir-se en el present treball. Aquest obstacle es supera aplicant la *teoria del règim* a l'extensa base de dades de la vall de l'Ebre amb l'objectiu de conèixer la geometria hidràulica de les lleres en estiatge. Es comparen les amplades B , els calats mitjans y_m , la velocitat mitjana v_m i el pendent S mesurades per D. Pedro Antonio amb les magnituds proporcionades per les quatre metodologies escollides, representatives dels diferents corrents investigadors: Simons i Albertson (1963), Parker *et al.* (2007), Altunin (1962) i Lee i Julien (2006), essent els dos últims els que presenten una millor correlació a partir de l'anàlisi estadístic realitzat. La relació de proporcionalitat $B \propto Q^{0.5}$ es confirma també per a mesures en estiatge i, globalment, els perfils transversals presenten unes formes més amples i poc profundes que les teòricament estables. Durant el desenvolupament del treball es tenen en compte les distorsions que l'estiatge pot haver introduït.

El mètode del perímetre mullat s'implementa per a determinar els cabals mínims Q_{\min} , pas previ per a garantir un veritable règim de cabals ambientals. El Q_{\min} obtingut per al tram inferior de l'Ebre de $108.8 \text{ m}^3/\text{s}$ és gairebé idèntic al proposat actualment en condicions de sequera (Sánchez i Ibáñez, 2008).

Title: Hydraulic geometry of the Ebro valley during the low water season of 1863.

Author: Sergi Capapé Miralles

Supervisor: Juan Pedro Martín Vide

Keywords: hydraulic geometry; fluvial morphology; regime theory; gravel river; database; natural regime; minimum flow; wetted perimeter; Ebro.

ABSTRACT

During the low water season of 1863, a team lead by Civil Engineer Don Pedro Antonio De Mesa Arroquia started a journey in which the first hydrologic reconnaissance of Ebre valley was completed. 231 gauges were performed, 129 of which were represented by the shapes and dimensions of the cross-sectional flow area. Due to the insignificant anthropic pressure over the fluvial systems in 19th century's Spain, it is considered that the Ebre and its tributaries flowed within its natural regime. Nowadays the situation has completely changed with the introduction of severe basin regulations. The preservation and recuperation strategies to regain the natural flow regime in rivers are the *road map* of the main responsible organizations.

The anthropic pressure over the fluvial systems during the 19th century was yet small in Spain. This circumstance allowed rivers to flow with its natural regime.

Rivers flowing on alluvial deposits are an element in constant evolution if the surroundings allow it, both in plan as well as in elevation. Water flow Q , bed slope S and mean diameter of the river bed particles d_{50} are decisive variable in the configuration of the hydraulic geometry. The *regime theory*, also known as the study of the river bed under equilibrium conditions, investigates how to obtain a solid formulation which can provide a way to get the dimensions of stable cross-sections, being very useful in channeling and river fringe protection.

Dominant discharge -and not the water flow associated with the low water season- is a requirement which cannot be met in this project. This obstacle can be overcome by applying the *regime theory* to the vast Ebre valley database, with the objective of revealing the hydraulic geometry of the low water flow streams. Width B , mean depth y_m , mean velocity v_m and bed slope S measured by Mr. De Mesa are compared with the obtained values using four selected methodologies which represent main research trends, i.e. the works of Simons and Abertson (1963), Parker *et al.* (2007), Altunin (1962) and Lee and Julien (2006). The last two afford the best results in terms of correlation with the real values from the statistical analysis of the data. The proportional relation $B \propto Q^{0.5}$ is confirmed in low water season and, as a whole, the river cross-sections show wider and shallower shapes than those theoretically stable. It is necessary, however, to take into account the distortions that might be introduced by the low water data.

The wetted perimeter method is set up to establish the minimum flow Q_{min} , which constitutes the first step in guaranteeing true ecological flow regimes. Q_{min} obtained for Ebre's lower stretch is $108.8 \text{ m}^3/\text{s}$, being almost identical to the currently proposed in drought conditions (Sánchez and Ibáñez, 2008).

AGRAÏMENTS

Tot sembla indicar que el rierol ja desemboca. Després de créixer amb l'ajuda de grans afluents, d'abandonar la llera recta per una de lliure on trobar-s'hi a gust i de tastar aigües internacionals, arriba al final d'una etapa. No desemboca al mar, però. És a un riu més cabalós i que el conduirà qui sap on.

A aquells que aprecio: permeteu-me el gust d'agrair-vos personalment tota l'ajuda que m'heu donat, no us sàpiga greu no aparèixer en aquestes línies.

Vull agrair Rogelio Galván, per la seva col·laboració al facilitar-me el facsimil del reconeixement hidrològic de l'Ebre i les seves ràpides i efectives respostes. Tan de bo aquest treball li agradi.

Agraeixo especialment el grup de recerca *sense nom* del Departament d'Enginyeria Marítima, Hidràulica i Ambiental encapçalat per J.P.Martín Vide, el meu tutor ara i, així ho espero i m'agradaria, en els propers anys. També els companys d'aquest nou periple postuniversitari que enceto Carles Ferrer, Eduard Rodríguez i Francisco Núñez, amb qui espero gaudir de molt bons moments.

Els últims agraïments són pels primers. El meu germà o tato (i altres termes que no reproduiré), per les teves correccions i perquè aquest és el colofó de moltes coses i sempre, des d'Alemanya o Catalunya, he rebut el teu suport. Tristament el iai, perquè ets una peça clau en el camí que m'ha dut fins aquí i malauradament ja no hi seràs per celebrar-ho. T'estaré agraït per tot, sempre. La meua mare, per haver estat el motor de tot plegat. Tan de bo algun dia et pugui correspondre a tot el que m'has donat.

Y la guinda (en castellano): quiero dedicar la carrera a mi padre, pues tú has sido el motivo por el que hoy soy ingeniero.

ÍNDEX

RESUM.....	III
ABSTRACT.....	IV
AGRAÏMENTS.....	V
ÍNDEX DE TAULES	IX
ÍNDEX DE FIGURES.....	XI
LLISTA DE SÍMBOLS	XV
1 INTRODUCCIÓ.....	1
1.1 L'EBRE DOS SEGLES ENRERE	1
1.2 LA MOTIVACIÓ DE D. PEDRO ANTONIO: ELS RECURSOS HÍDRICS.....	2
2 LA MOTIVACIÓ PERSONAL: LA DESCOBERTA D'UN TREBALL PIONER	4
3 OBJECTIUS: LA CONCA FLUVIAL DE L'EBRE.....	6
4 RECONOCIMIENTO HIDROLÓGICO DEL VALLE DEL EBRO	8
4.1 INTRODUCCIÓ	8
4.2 PRINCIPALS LIMITACIONS TÈCNIQUES I MANCANCES DEL RECONeixEMENT.....	10
4.3 L'ESTIATGE	12
4.3.1 L'ESTIATGE A L'ENGINYERIA	12
4.4 L'ENGINYERIA DE RIUS DEL RECONeixEMENT HIDROLÒGIC DE D. PEDRO ANTONIO.	15
4.5 TRACTAMENT DE LES DADES.....	16
4.6 INFORMACIÓ COMPLEMENTÀRIA.....	16
4.6.1 GRANULOMETRIA	16
4.6.2 AFORAMENTS ACTUALITZATS.....	17
4.7 COMPENDI DE LA INFORMACIÓ TRACTADA.....	18
4.8 L'EBRE DE FINALS SEGLE XIX EN DADES	19
5 LA TEORIA DEL RÈGIM	21
5.1 INTRODUCCIÓ	21
5.2 RESTRICCIONS.....	22
5.3 APLICACIÓ DE LA TEORIA DEL RÈGIM	25
5.3.1 MÈTODES SELECCIONATS: MOTIUS I CONDICIONANTS.....	26
5.4 MÈTODE DE SIMONS I ALBERTSON	27
5.4.1 INTERVALS D'APLICABILITAT DE LES VARIABLES	28

5.5	MÈTODE D'ALTUNIN.....	29
5.5.1	INTERVALS D'APLICABILITAT DE LES VARIABLES.....	32
5.6	EQUACIONS DE LEE I JULIEN (2006) A PARTIR DE JULIEN I WARGADALAM (1995).....	32
5.6.1	ANÀLISI DELS EXPONENTS DE LES EQUACIONS DE LEE I JULIEN (2006).....	33
5.6.2	INTERVALS D'APLICABILITAT DE LES VARIABLES.....	34
5.7	L'APROPAMENT DE PARKER. L'ADIMENSIONALITZACIÓ.....	35
5.7.1	INTERVALS D'APLICABILITAT DE LES VARIABLES.....	37
5.7.2	PARKER MODIFICAT.....	37
5.8	LA COMPARACIÓ ENTRE ELS MÈTODES.....	39
5.8.1	FONAMENTS TEÒRICS.....	39
5.8.2	VARIABLES.....	39
5.8.3	EXPONENTS DEL CABAL.....	41
5.9	RESULTATS.....	43
5.9.1	ESTRUCTURACIÓ I MÈTODE D'AVALUACIÓ I DE PRESENTACIÓ DELS RESULTATS.....	43
5.9.2	MÈTODE DE SIMONS I ALBERTSON.....	44
5.9.3	DISCUSSIÓ.....	45
5.9.4	MÈTODE D'ALTUNIN (1962).....	47
5.9.5	DISCUSSIÓ.....	48
5.9.6	EQUACIONS DE LEE I JULIEN (2006).....	50
5.9.7	DISCUSSIÓ.....	51
5.9.8	FORMULACIÓ DE PARKER ET AL. (2007).....	53
5.9.9	DISCUSSIÓ.....	54
5.9.10	PARKER MODIFICAT.....	55
5.9.11	DISCUSSIÓ.....	56
5.9.12	EVOLUCIÓ DE LES DIFERÈNCIES ENTRE VALORS REALS I PREDITS.....	58
5.9.13	CARACTERÍSTIQUES DE L'ESTIATGE A LA VALL DE L'EBRE.....	59
5.9.14	ANÀLISI DE LES SECCIONS TRANSVERSALS DE LA VALL DE L'EBRE EN L'ESTIATGE.....	62
5.10	CONCLUSIÓ SOBRE LA TEORIA DEL RÈGIM.....	68
6	PASSAT I FUTUR.....	69
6.1	INTRODUCCIÓ.....	69
6.2	ELS PERFILS LONGITUDINALS: PENDENTS I CABAL.....	69
6.2.1	PERFIL LONGITUDINAL.....	70
6.2.2	PERFIL LONGITUDINAL DEL CABAL.....	71
6.3	CABAL MÍNIM: UN PAS CAP EL RÈGIM DE CABALS DE MANTENIMENT.....	72
6.3.1	CABAL DE MANTENIMENT.....	72
6.3.2	MÈTODE DE CÀLCUL.....	73

6.3.3	DEL CABAL DE MANTENIMENT AL CABAL MÍNIM: MÈTODE DEL PERÍMETRE MULLAT	74
6.3.4	LIMITACIONS A LA IMPLEMENTACIÓ DEL MÈTODE A LES DADES DEL RECONeixEMENT	75
6.3.5	INFORMACIÓ COMPLEMENTÀRIA	76
6.3.6	PROCEDIMENT.....	77
6.3.7	RESULTATS.....	77
6.3.8	DISCUSSIÓ	80
6.4	CONCLUSIÓ SOBRE ELS CABALS MÍNIMS.....	81
6.5	LA SITUACIÓ ACTUAL: BREU ESTUDI COMPARATIU	82
6.5.1	PROCEDIMENT.....	83
6.5.2	RESULTATS.....	83
6.5.3	DISCUSSIÓ	84
6.6	CONCLUSIONS A L'ESTUDI COMPARATIU.....	85
7	CONCLUSIONS FINALS.....	86
8	BIBLIOGRAFIA	88
8.1	OBRES CITADES.....	88
8.2	ALTRES REFERÈNCIES.....	90
	ANNEX A. AMPLIACIÓ TEÒRICA A LA FORMULACIÓ DE LEE I JULIEN (2006)	92
	ANNEX B. INDICADORS ESTADÍSTICS	94
	ANNEX C. GRÀFIQUES $ER-V_M$ I $ER-S$.....	96
	ANNEX D. MAGNITUDS DE LES VARIABLES DELS AFORAMENTS	97
	ANNEX E. LOCALITZACIÓ DELS AFORAMENTS	101
	ANNEX F. PERFILS TRANSVERSALS	105

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1. Aforaments del reconeixement*. Numeració de D. Pedro Antonio i ortografia corregida amb l'estudi de Galván Plaza (2009). De l'1 al 27: Regió superior. Del 28 al 91: Regió mitja. Del 92 al 129: Regió Inferior. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).....	9
Taula 2. Aforaments múltiples. Lleres dividides en dos braços, aforaments aigües amunt i aigües avall d'un punt singular, etc. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).	10
Taula 3. Granulometria acceptada per a la conca del riu Ebre. Font: elaboració pròpia.....	17
Taula 4. Resum de la informació base d'aquesta tesina. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).	18
Taula 5. Dades bàsiques del reconeixement de D. Pedro Antonio durant l'estiatge de 1863. Entre parèntesi les dades actuals que ofereix la CHE o altres fonts fiables. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).	19
Taula 6. Valors mitjans i rangs de les diferents variables que intervenen en els aforaments. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).	23
Taula 7. Rang de valors dels paràmetres avaluats per Simons i Albertson. Font: Maza i García (1996).	28
Taula 8. Exponents en valor absolut a les relacions de Lee i Julien (2006). En negreta el valor màxim per a cada relació i la resta en funció de la fracció del màxim que representen. Font: elaboració pròpia.....	34
Taula 9. Rang de les diferents variables dels rius i canals avaluats per Lee i Julien (2006) Font: Lee i Julien (2006)..	34
Taula 10. Interval de les variables de la base de dades utilitzada per Parker et al. (rius de grava de la Gran Bretanya, el Canadà i els Estats Units d'Amèrica). Font: Parker et al. (2007).	37
Taula 11. Fonaments teòrics en els diferents mètodes. Font: elaboració pròpia.....	39
Taula 12. Resum de les variables emprades pels autors dels mètodes mostrats. Font: elaboració pròpia.....	40
Taula 13. Exponents del cabal en les expressions dels diferents mètodes estudiats i en les relacions potencials de les dades de la vall de l'Ebre. Els exponents emprats per Lacey es mostren per ésser una de les primeres teories del règim completa per al disseny de canals estables. Els valors corresponents a Altunin s'han obtingut acceptant la simplificació que proposa amb l'expressió [19], aprofitant que el cabal Q no depèn dels esforços tallants a la llera (τ_b i τ_c) (apartat 5.5). Font: elaboració pròpia.....	42

Taula 14. Paràmetres de la regressió i indicadors estadístics emprats en l'anàlisi dels resultats utilitzant el mètode de Simons i Albertson (1963). Font: elaboració pròpia.....	45
Taula 15. Mitjanes de les variables de geometria hidràulica dels 21 aforaments dins dels intervals d'aplicabilitat de Simons i Albertson (esquerra) i les corresponents de les prediccions (dreta). Font: elaboració pròpia.	46
Taula 16. Paràmetres de la regressió i indicadors estadístics emprats en l'anàlisi dels resultats utilitzant el mètode d'Altunin (1962). Font: elaboració pròpia.....	48
Taula 17. Mitjanes de les variables de geometria hidràulica dels 148 aforaments dins dels intervals d'aplicabilitat d'Altunin (esquerra) i les corresponents de les prediccions (dreta). Font: elaboració pròpia.....	49
Taula 18. Paràmetres de la regressió i indicadors estadístics emprats en l'anàlisi dels resultats utilitzant la formulació de Lee i Julien (2006). Font: elaboració pròpia.....	51
Taula 20. Mitjanes de les variables de geometria hidràulica dels 146 aforaments dins dels intervals d'aplicabilitat de Lee i Julien (esquerra) i les corresponents de les prediccions (dreta). Font: elaboració pròpia.....	52
Taula 20. Paràmetres de la regressió i indicadors estadístics emprats en l'anàlisi dels resultats utilitzant la formulació de Parker et al. (2007). Font: elaboració pròpia.	54
Taula 21. Mitjanes de les variables de geometria hidràulica dels 58 aforaments dins dels intervals d'aplicabilitat de Lee i Julien (esquerra) i les corresponents de les prediccions (dreta). Font: elaboració pròpia.....	55
Taula 22. Paràmetres de la regressió i indicadors estadístics emprats en l'anàlisi dels resultats utilitzant la formulació de Parker modificat. Font: elaboració pròpia.	56
Taula 23. Percentatges de les amplades, calats i seccions mullades reals (R) que són superiors, iguals o inferiors als predits pel mètode de Lee i Julien (P). El criteri perquè $R = P$ és: $R = P \pm 0.05 \cdot P$. Font: elaboració pròpia.	60
Taula 24. Geometries hidràuliques trobades als aforaments de D. Pedro Antonio respecte de les teòriques estables. Entre parèntesis el percentatge respecte del total de cada regió. Fons: elaboració pròpia a partir de Mesa Arroquia (1865).....	63
Taula 25. Cabals mínims (Q_{\min}) calculats amb el mètode del perímetre mullat a partir de les dades del reconeixement (Q_{1863}) i magnituds dels cabals en sequera proposats per Sánchez i Ibáñez (2007) (Q_{sequera}). El repunt a les gràfiques de $y/y_{\max} - P/P_{\max}$ és determinant. S'inclou el percentatge del Q_{\min} respecte del Q_{1863} . Font: elaboració pròpia a partir de les dades de Mesa Arroquia (1865) i Sánchez i Ibáñez (2008).....	78
Taula 26. Resultats comparatius entre la geometria hidràulica dels perfils transversals del reconeixement de 1863 i els actuals. Act. Indica valors actuals. En negreta els màxims per a cada variable. El número que acompanya la situació indica la fotografia aèria de la zona a la Figura 38. Font: elaboració pròpia.	83

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1. Tram de l'Ebre prop de Pesquera de Ebro dins del sistema conegut com "Cañón del Ebro" o "Hoces del Ebro". Font: David Martín.	2
Figura 2. Esquerra: Pla general de l'Ebre i els seus afluents que D. Pedro Antonio adjunta en la memòria reconeixement. Dreta: Principals rius de la conca de l'Ebre segons el Pla hidrològic de la conca de l'Ebre. Font: De Mesa Arroquia (1865) i Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) (ftp://oph.chebro.es).....	4
Figura 3. Portada del reconeixement realitzat per l'enginyer D. Pedro Antonio. Font: De Mesa Arroquia (1865).....	8
Figura 4. Distribució de velocitat i cabal unitari en un riu. S'assenyala la vertical en la que suposadament D. Pedro Antonio llençaria el flotador per a mesurar la velocitat. Font: modificat de Martín Vide (2002).	11
Figura 5. Aigües altes i aigües baixes en una llera tipus. No a escala. Font: elaboració pròpia.	13
Figura 6. Hidrogrames diaris de l'Ebre a Arroyo abans (amunt, any 1943) i després (avall, any 1997) de la construcció de l'Embassament de l'Ebre. Eix vertical en escala logarítmica. Font: CHE (2006).....	14
Figura 7. Hidrogrames diaris combinats de dos anys hidrològics (de setembre a octubre) de l'Ebre a Tortosa. En vermell: oct. 1912 fins set. 1913 quan encara no s'havia construït cap gran presa a la conca fluvial de l'Ebre. En blau: oct. 2006 fins set. 2007 representatiu de l'actualitat, amb un riu Ebre fortament regulat sobretot en el seu tram inferior (embassaments de Mequinensa, Ribarroja, etc.). Es vol fer notar el canvi en la variabilitat dels cabals; el decreixement del cabal total aforat pot ésser degut a diversos factors no avaluats en aquest treball. Font: elaboració pròpia a partir de dades del CEDEX (http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/default.asp).....	14
Figura 8. Exemple d'una secció transversal tipus dibuixada al Reconocimiento Hidrológico del valle del Ebro. S'observen les dades especificades: B , A , v_m , Q com producte de $A \cdot v_m$ i l'equidistància entre les mesures de la profunditat. Les variables s'expressen en el Sistema Internacional d'Unitats. Font: De Mesa Arroquia (1865).	15
Figura 11. Amunt: secció de dimensions més properes a les mitjanes geomètriques de tots els aforaments. Avall: secció de dimensions més properes a les mitjanes aritmètiques de tots els aforaments. Es vol fer notar que la mitjana aritmètica proporciona unes magnituds similars a les d'una secció transversal a la regió inferior; la mitjana geomètrica les proporciona a la regió mitja. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).	23
Figura 10. Llera trapeziforme adoptada com a model pel disseny de les seccions estables predites pels diferents mètodes. Font: modificat de Maza i Gacía (1996).	25

Figura 11. Cal tenir present que els mètodes consideren la secció mullada que ocupa el cabal en estiatge com la corresponent al cabal dominant, és a dir, com si els marges fossin els puntejats. Font: elaboració pròpia.	26
Figura 12. Amplada adimensional, calat adimensional i pendent com a funcions del cabal adimensional. Eixos logarítmics. Les equacions de les regressions lineals d'ajust potencial corresponen a les equacions [41] – [43] i es mostren en la gràfica juntament amb els coeficients de determinació. Font: elaboració pròpia.....	38
Figura 13. Variació de B , y_m , v_m i S amb Q dels 148 aforaments de la vall de l'Ebre. Les dades s'han classificat segons la regió a la que pertanyen. Es comprova que no hi ha un ordre i que les dades apareixen barrejades i amb força dispersió. Els eixos són logarítmics. Les rectes de regressió es mostren en les gràfiques i el subíndex e significa estimació. Els coeficients de determinació de v_m - Q i S - Q són molt baixos.....	41
Figura 14. Comparació entre els valors de B , y , v_m i S predits pel mètode de Simons i Albertson (1963) i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 21 aforaments. Font: elaboració pròpia.....	45
Figura 15. Comparació de la secció estable a partir dels resultats de Simons i Albertson (ratllada) amb la secció de l'aforament a l'Ebre (número 18) a San Martín de Helines. La secció estable s'obté a partir de la Figura 10 i el talús és 2v:3h per ser àmpliament utilitzat i recomanat a la pràctica. L'escala vertical està exagerada en un factor 10. Font: elaboració pròpia.....	46
Figura 16. Comparació entre els valors de B , y_m , v_m i S predits pel mètode d'Altunin (1962) i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 148 aforaments. Font: elaboració pròpia.....	48
Figura 17. Comparació de la secció estable a partir dels resultats d'Altunin (ratllada) amb la secció de l'aforament a l'Irati (número 72) a Arive. La secció estable s'obté a partir de la Figura 12 i el talús és 2v:3h per ser àmpliament utilitzat i recomanat a la pràctica. L'escala vertical està exagerada en un factor 10. Font: elaboració pròpia.....	49
Figura 18. Comparació entre els valors de B , y_m , v_m , θ i S predits per Lee i Julien (2006) i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 146 aforaments. Font: elaboració pròpia.....	51
Figura 19. Comparació de la secció amb valors mitjans d'amplada i calat mitjà predita per les fórmules de Lee i Julien (ratllada) amb la secció de l'Irati en el seu pas per Arive (número 72). L'escala vertical està exagerada en un factor 10. Font: elaboració pròpia.	52
Figura 20. Comparació entre els valors de B , y_m i S predits pel mètode de Parker et al. (2007) i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els	

coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 58 aforaments. Font: elaboració pròpia.	53
Figura 21. Comparació de la secció amb valors mitjans d'amplada i calat mitjà predita per les fórmules de Parker et al. (ratllada) amb la secció de l'Ebre en el seu pas per Pangusón (número 24). L'escala vertical està exagerada en un factor 10. Font: elaboració pròpia...	55
Figura 22. Comparació entre els valors de B , y_m i S predits per Parker modificat i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 148 aforaments. Font: elaboració pròpia.	56
Figura 23. Representació de la llera d'aigües baixes en un riu i la influència en el pendent. Font: modificat de Martín Vide (2002).	58
Figura 24. Diferències entre els valors calculats a partir de les diferents formulacions (Simons i Albertson, Altunin, Lee i Julien, Parker et al. i Parker modificat) i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio de B i y_m pels aforaments que s'accepten a cada mètode. S'expressa en forma d'error relatiu (ER). $ER > 0$ indica que el valor real és major que el predit, $ER < 0$ indica que el valor predit és major que el real. *L'ER de Simons i Albertson són pel calat màxim y i no pel calat mitjà y_m . Font: elaboració pròpia.	59
Figura 25. Comparació entre els valors de A predits per Lee i Julien i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 148 aforaments. r^2 augmenta al respecte de les gràfiques de $y_{mr}-y_{mp}$ i B_r-B_p . Font: elaboració pròpia.....	61
Figura 26. Perfils transversals reals de dimensions proporcionals a les teòriques d'equilibri o estables: $y_{mr}/y_{mp} \approx B_r/B_p$ però $A_r \neq A_p$. L'escala vertical està exagerada en un factor 10. Font: elaboració pròpia.....	62
Figura 27. Comparació entre els quocients B_r/B_p i y_{mr}/y_{mp} . Les línies que es creuen centrals marquen la igualtat. La gràfica queda dividida en quatre quadrants. D'esquerra a dreta i d'amunt a avall: secció transversal més ampla però més estreta, més ampla i més profunda, menys profunda i més estreta i més ampla però menys profunda. Eixos logarítmics. Es representen 148 aforaments. Font: elaboració pròpia.	63
Figura 28. Perfil longitudinal (a) i planta (b) d'una seqüència de ràpids i basses (step-pool). En (a) s'observa gràficament com en aigües baixes aquest fenomen és més acusat. Font: Dunne i Leopold (1978).	64
Figura 29. Relació de forma (B/y_m) real i predita segons Lee i Julien (2006). Eixos logarítmics. Tot i la baixa correlació entre els valors reals i predits ($r^2 = 0.18$) la tendència és clara i la majoria dels resultats (75%) indiquen $(B_r/y_{mr}) > (B_p/y_{mp})$. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 148 aforaments. Font: elaboració pròpia.....	65

- Figura 30. Aforament al Cruceo amb forma proporcional a la teòrica estable. Amunt i en blau: superfície que ocuparia un hipotètic cabal $Q_1 < Q$. Avall i en blau: secció comprensiblement abocada per les equacions. Escala no exagerada en cap eix. Font: elaboració pròpia.66
- Figura 31. Comparació entre els quocients v_{mr}/v_{mp} i B_r/B_p . Les línies que es creuen centrals marquen la igualtat. Les v_{mr} majors corresponen a les B_r més petites. Eixos logarítmics. Es representen 148 aforaments. Font: elaboració pròpia.66
- Figura 32. Amunt i ratllat: aforament a l'Ega (núm. 49). Avall i ratllat: aforament a l'Urederra en la desembocadura a l'Ega (núm. 53). Els marges més enllà de la secció mullada són hipotètics per a ambdues seccions. La línia discontinua indica la cota del cabal dominant. Escala no exagerada en cap eix. Font: elaboració pròpia.....67
- Figura 33. Perfil longitudinal del riu Ebre (en negre) dividit en regions segon D. Pedro Antonio (veure llegenda). Es coneix l'elevació i la distància a l'origen de la vall de l'Ebre de 43 punts (làmina adjunta en el Reconocimiento Hidrológico del Valle del Ebro). Es superposa corba de la funció logarítmica que millor s'adapta a les dades (en blau i puntejat). L'expressió de la corba i el coeficient de determinació r^2 es mostren a la gràfica. Font: elaboració pròpia.....71
- Figura 34. Perfil longitudinal de l'evolució del cabal al riu Ebre. Es marquen els 8 canvis de cabal més importants. Font: elaboració pròpia a partir de les dades de Mesa Arroquia (1963).72
- Figura 35. Representació gràfica del mètode. Esquerra: secció transversal tipus amb 2 punts de ruptura. Dreta: corba Q-P amb zones destacades. No pertany a cap aforament de la vall de l'Ebre. Font: redibuixat de Leathe i Nelson (1986).74
- Figura 36. Corbes Q-P i P-y de les seccions de l'Ebre a Mequinensa i del Gállego a Anzánigo. Presenten característiques que compliquen la determinació del Q_{min} (en vermell). Eix vertical dels perfils transversals exagerat en un factor 10. Font: elaboració pròpia.78
- Figura 37. Corbes Q-P i P-y normalitzades per a l'Ebre a Calahorra i a Flix, el Segre a Organyà i el Jalón a Calatayud. La multiplicitat de punts de ruptura, la suavitat en el canvi de pendent o l'horitzontalitat de la corba dificulten la determinació del Q_{min} . El cercle verd indica els punts escollits per a determinar-lo. Eix vertical dels perfils transversals exagerat en un factor 10. Font: elaboració pròpia.80
- Figura 38. Emplaçament aproximat de les seccions transversals comparades. Font: elaboració pròpia a partir d'imatges de Google Maps.84

LLISTA DE SÍMBOLS

SÍMBOLS ROMANS

A	àrea mullada pel flux	m^2
a	coeficient en la formulació d'Altunin	-
b	base menor de la llera trapeziforme	m
B	amplada de la superfície lliure de la llera	m
\tilde{B}	amplada adimensional de la superfície lliure de la llera	-
b_m	ample mitjà de la llera	m
d_{50}	mediana de la distribució dels diferents diàmetres del material de la llera	m
d_m	diàmetre mitjà del material de la llera	m
$DQMR$	desviació quadràtica mitjana relativa	-
E	coeficient en la definició d'Altunin	-
g	acceleració gravitatòria	m/s^2
k	invers del pendent del talús de la llera trapeziforme	-
K	coeficient de forma	-
m	coeficient en la definició d'Altunin	-
n	coeficient de Manning	-
n_B	coeficient de calibració per a Parker <i>et al.</i>	-
n_S	coeficient de calibració per a Parker <i>et al.</i>	-
n_{ym}	coeficient de calibració per a Parker <i>et al.</i>	-
P	perímetre mullat de la llera	m
Q	cabal	m^3/s
\hat{Q}	cabal adimensional	-
r^2	coeficient de determinació	-
Re	número de Reynolds	-
R_h	radi hidràulic de la llera	m
S	pendent de la llera	-
s	densitat relativa del material	-
U	coeficient de desigualtat de Theil	-
U_b	proporció d' U associada a la desviació mitjana	-

U_b	proporció d'U associada a la variància no explicada	-
$U_{\beta=1}$	proporció d'U associada al pendent de la regressió lineal	-
v^*	velocitat de fricció	m/s
v_ϕ	velocitat mitjana del corrent quan circula un calat d'un metre	m/s
v_m	velocitat mitjana del flux	m/s
y	calat màxim de la llera	m
\tilde{y}_m	calat mitjà adimensional de la llera	-
y_m	calat mitjà de la llera	m

SÍMBOLS GRECS

α	exponent en la formulació d'Altunin	-
α_B	coeficient de calibració per a Parker <i>et al.</i>	-
α_S	coeficient de calibració per a Parker <i>et al.</i>	-
α_{ym}	coeficient de calibració per a Parker <i>et al.</i>	-
β	pendent de la recta de regressió lineal	-
γ	pes específic de l'aigua	N/m ³
θ	paràmetre de Shields	-
θ_c	paràmetre de Shields crític	-
τ_b	tensió tallant al fons de la llera	N/m ²
τ_c	tensió tallant crítica	N/m ²
ν	viscositat cinemàtica	m ² /s

SUBÍNDEX

$mín$	mínim
$màx$	màxim
p	valor predit
r	valor real

1 INTRODUCCIÓ

1.1 L'EBRE DOS SEGLES ENRERE

La història de l'enginyeria està farcida de grans personatges que han romàs anònims per a la majoria de la societat. Des del naixement de les grans civilitzacions fins a l'actualitat, des del picar pedra i les piràmides fins als nous materials polimèrics i els gratacels de les metròpolis, innumbrables savis s'han dedicat a revelar i difondre els coneixements i les tècniques que enriqueixen la humanitat.

Don Pedro Antonio de Mesa Arroquia¹ fou un d'aquests grans desconeguts que des de ben petit va mostrar les dots i aptituds (Martínez Cobo, 2008) que el van portar a finalitzar els estudis de *Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos* a Madrid a mitjan segle XIX, deu anys després de l'obertura de l'Escola. D'aleshores ençà va ocupar diversos càrrecs de rellevància, destacant el seu treball en la creació de noves línies a l'incipient ferrocarril de l'Estat espanyol (per exemple, la línia Còrdova-Màlaga i l'impressionant *Paso del Chorro*), el disseny i execució del port marítim de Gijón i la seva posició com a *Jefe de la Brigada Hidrológica de la Junta General de Estadística*, d'on en resulta el document *Reconocimiento hidrológico del valle del Ebro*, fonamental per a la realització del present treball. D. Pedro Antonio va ser un impulsor dels estudis hidrològics a l'estat espanyol i malgrat la limitació dels recursos pressupostaris (Sierra Álvarez, 1996) va finalitzar els estudis hidrològics dels rius Guadalquivir, Ebre, Duero i Guadiana (Martínez Cobo, 2008). Els dos primers van gaudir d'un merescut reconeixement tal i com se'n feu ressò a la *Revista de Obras Públicas*, on se'n felicitava l'autor (Memoria sobre el reconocimiento hidrológico del valle del Ebro, 1865).

¹ En endavant D. Pedro Antonio, forma escurçada que s'adopta en el present treball d'acord amb la biografia del seu rebesnét Martínez Cobo (2008).

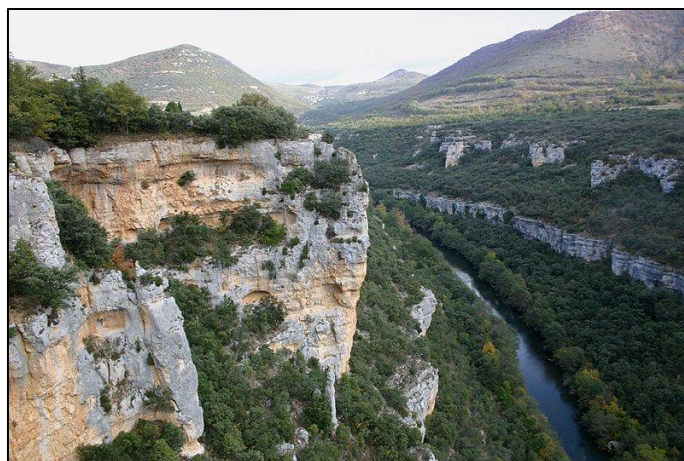


Figura 1. Tram de l'Ebre prop de Pesquera de Ebro dins del sistema conegut com "Cañón del Ebro" o "Hoces del Ebro". Font: David Martín.

Corria el mes de juliol del 1863 quan el *ingeniero-jefe* Mesa va emprendre el primer reconeixement hidrològic de la conca del riu Ebre. Una tasca no mancada de duresa i entrebancs donades les condicions a les que ell i la seva brigada havien de fer front. No només van haver de recórrer al voltant de cinc mil quilòmetres a cavall i en mula (és a dir, a raó de quaranta quilòmetres diaris), sinó que calia vèncer els obstacles que suposaven les escasses vies de comunicació de l'època i la necessitat de seguir el curs del riu per els marges (Galván Plaza, 2009) (Figura 1).

El viatge va concloure l'octubre d'aquell mateix any a la desembocadura del riu. Haurien de transcórrer dos anys per enllestir la publicació de l'estudi complert, del que el propi D. Pedro Antonio es disculpa a la introducció pels "*mil defectos de observación; que la (sic) experiencia² y nuevos estudios irán corrigiendo*" (De Mesa Arroquia, 1865). Tot i les errades que pugui contenir el document i de les que més endavant se'n farà esmena, la gran vàlua d'aquests treballs resta fora de tota discussió.

1.2 LA MOTIVACIÓ DE D. PEDRO ANTONIO: ELS RECURSOS HÍDRICS

En uns anys de relativa bonança corresponents al govern *llarg* d'O'Donnell, la *Ley de Medición del Territorio* de 1859 (duta a terme per la *Junta General de Estadística*) va impulsar una millora de la coneixença de la quantitat d'aigua que circulava pel territori espanyol.

Paral·lelament, les pressions que el govern rebia per fer concessions hidràuliques eren cada cop majors, en gran part degudes a l'augment de la importància de l'aigua per a regadiu (Morales, Piqué i González, 1995) i al proveïment d'aigua per a les grans ciutats emprant les flamants obres d'enginyeria. Així doncs, no és d'estranyar que en els estudis que D. Pedro Antonio va

² Nota d'estil: els fragments en castellà extrets de la bibliografia són exposats en el present text en cursiva i sense correccions ortogràfiques.

elaborar tinguessin un valor especial totes aquelles dades que permetessin conèixer la riquesa d'aigua aprofitable per a la indústria, el regadiu i l'abastiment d'aigua potable.

D. Pedro Antonio era conscient que calia canviar la gestió governamental de l'aigua i fer-ne un repartiment d'acord amb les necessitats reals, en lloc de les concessions sense miraments a particulars. Sembla que les bones pràctiques van sortir efecte, ja que a partir de 1865 es van intensificar les tasques de reconeixement hidrològic a tota la península. Un exemple en resulta l'elaboració de la *Instrucción para los estudios hidrológicos* que establia la configuració i els continguts dels documents dels reconeixements (Sierra Álvarez, 1996).

2 LA MOTIVACIÓ PERSONAL: LA DESCOBERTA D'UN TREBALL PIONER

L'enginyeria de rius és una ciència incerta, sense axiomes en la majoria de les seves branques i de caràcter eminentment empíric. Cal una anàlisi global del medi per on els rius flueixen, desborden, reguen i fins i tot moren. L'evolució de l'home ha portat a modificar els cursos dels rius, a construir-hi infraestructures i a transvasar l'aigua que *naturalment* circula per la llera. ¿Es té prou coneixement de les lleis fonamentals que governen els rius per transformar-los de la manera que s'està duent a terme?

Són pocs els rius que romanen intactes i que han pogut viure el pas del temps adaptant lliurement el seu curs i forma a les circumstàncies de l'època. Grans civilitzacions com l'egípcia i les mesopotàmiques van desenvolupar la seva cultura al voltant d'importants rius com ho són el Nil, el Tigris i l'Èufrates. L'aigua i els peixos, el reg de cultius i el transport de persones i mercaderies són beneficis que el riu ofereix i que no poden passar –i així ho demostra la història- desapercibuts.

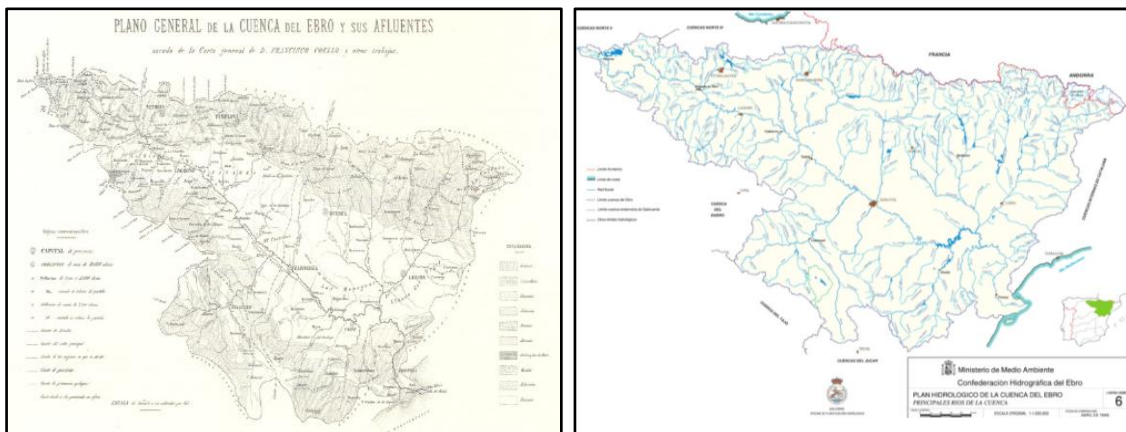


Figura 2. Esquerra: Pla general de l'Ebre i els seus afluents que D. Pedro Antonio adjunta en la memòria reconeixement. Dreta: Principals rius de la conca de l'Ebre segons el Pla hidrològic de la conca de l'Ebre. Font: De Mesa Arroquia (1865) i Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) (<http://oph.chebro.es>).

El treball dirigit per D. Pedro Antonio presenta un riu Ebre en diversos punts radicalment diferent al que es coneix avui en dia. Cap gran presa havia estat construïda. Petites rescloses i derivacions, a més d'alguns ponts i obres puntuals de dragatge per a facilitar la navegabilitat, eren les actuacions més rellevants que s'havien realitzat al riu. Es tracta d'un document pioner que va posar a l'abast de l'enginyer dades d'un riu en molts trams en estat *natural*, és a dir, sense que l'home hagués posat encara la seva empremta.

Això ofereix una oportunitat única de tractar el riu Ebre i la conca que el nodreix des d'un punt de vista que cap estudi actual podria copsar. Les necessitats dels regants, el subministrament d'aigua potable, la producció d'energia elèctrica, els interessos polítics o els serveis lúdics, entre d'altres aportacions, semblen haver amagat la vertadera naturalesa del que significa un riu, on són moltes les variables que hi intervenen i que de la salut del propi riu en depenen. El Delta de l'Ebre és un bon indicador de fins a quin punt les coses han canviat a la conca fluvial i la seva regressió (Jiménez i Sánchez-Arcilla, 1993 citat a Dolz *et al.*, 1997) té fonamentalment el seu origen en les regulacions introduïdes en el riu amb la construcció dels embassaments (Palanques i Guillén, 1992).

Indubtablement, ha estat un privilegi poder disposar de material on és plasmada la morfologia hidràulica en diversos indrets del curs de l'Ebre i dels seus afluents -malgrat sigui representativa únicament de l'estiatge del 1863- abans dels grans canvis que s'iniciaren a partir del segle XX.

3 OBJECTIUS: LA CONCA FLUVIAL DE L'EBRE

En aquesta tesina es pretén treure el màxim rendiment a tota la informació referent a la morfologia del riu Ebre durant l'estiatge de 1863, de la que té detallades referències gràcies a l'empenta i l'esforç de l'Enginyer de Camins, Canals i Ports Don Pedro Antonio de Mesa.

L'ús de l'anomenada *Teoria del Règim*, fonamental per a poder interpretar tota la informació que se'n disposa, serà el fil conductor de la primera part del present treball on a partir de l'aplicació en els diferents aforaments disponibles s'obtidran conclusions sobre la geometria hidràulica del riu Ebre i els seus afluents. Complementàriament, i gràcies a la possessió de dades actualitzades de la conca, es realitzarà un breu estudi comparatiu d'alguns punts concrets de la xarxa. Alhora s'iniciarà una anàlisi dels cabals de manteniment i, en general, s'investigarà l'evolució de les diferents variables rellevants relatives a la dinàmica fluvial que hom pot trobar al llarg del reconeixement.

Els objectius principals volen respondre les següents qüestions:

- Durant l'estiatge, presenta el riu trets característics identificables?
- Són quantificables els canvis en la morfologia dels rius de la conca d'ençà fins a l'època actual?

En una segona jerarquia, els objectius resolen els següents interrogants:

- Quines particularitats s'observen en estudiar el perfil longitudinal del riu Ebre?
- Com evoluciona el cabal de l'Ebre des de la capçalera fins a la desembocadura?
- Es poden extreure conclusions a partir dels cabals de manteniment o mínims?
- L'estiatge és un fenomen que cal evitar?

El pla de treball fixat s'estructurarà de la següent forma:

- I. Posar en context l'obra de D. Pedro Antonio: l'estiatge a la conca fluvial de l'Ebre l'any 1863. S'obté una idea general de la vàlua de les dades i es recopila informació actual de la conca.

-
- II. Interpretació de les dades i digitalització: es confeccionen els fulls de càlcul necessaris i que incorporen tota la informació organitzada. Els aforaments s'ordenen de la mateixa manera que D. Pedro Antonio els mostra en el document.
 - III. Creació d'un model hidràulic per tal d'agilitzar el càlcul i fer les pertinents comprovacions, es confecciona el model mitjançant l'aplicació HEC-RAS 4.0 on cada secció és duplicada per tal de formar un tram independent. Es calibren els paràmetres de Manning per a cadascuna de les seccions i s'obté l'evolució dels paràmetres amb el cabal.
 - IV. Introducció a la Teoria del Règim: s'estudien les diferents teories del règim que millor s'ajusten a l'interval de magnituds de les variables en el reconeixement.
 - V. Implementació i anàlisi: a partir dels resultats obtinguts s'obtenen conclusions sobre les dimensions de les seccions i s'estén l'estudi a altres conceptes (cabals ecològics, pendents, etc). Es comparen seccions actuals amb les aforades per D. Pedro Antonio i es fa una avaluació general.

Concloent, l'objectiu global de la tesina consisteix en analitzar amb rigor el primer reconeixement hidrològic de l'Ebre, de gairebé un segle i mig d'antiguitat, des de la perspectiva que ofereix l'enginyeria fluvial actual.

4 RECONOCIMIENTO HIDROLÓGICO DEL VALLE DEL EBRO

4.1 INTRODUCCIÓ

L'obra (Figura 3) és una peça clau en la planificació hidrogràfica espanyola de finals del segle XIX i principis del XX. La seva estructuració segueix un raonament lògic: s'inicia amb una descripció física de la conca del riu que inclou la situació geogràfica, les dimensions, els pendents, els afluents i la geologia bàsica i es completa amb un resum de la població i dels cultius que s'hi poden trobar.

Un tret característic és la divisió del curs del riu Ebre en tres regions. La primera, la superior, que comprèn des de l'inici del riu fins a Miranda de Ebro; la segona, la mitja, que arriba fins a Saragossa; i finalment la tercera, la inferior, que abasta des de la capital aragonesa fins la desembocadura del riu al mar Mediterrani³. Aquestes regions estan ben delimitades per les fronteres naturals (valls, rius i serres) i són tractades independentment al llarg de la memòria.

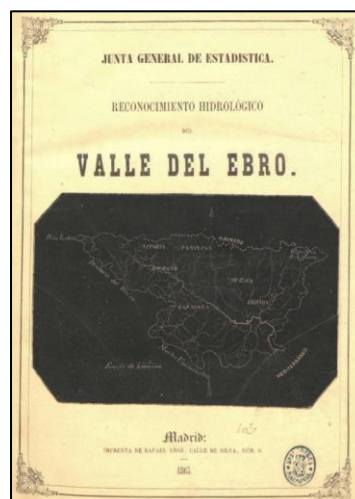


Figura 3. Portada del reconeixement realitzat per l'enginyer D. Pedro Antonio. Font: De Mesa Arroquia (1865).

³ L'estudi recent d'Ollero et al. (2004) amplia la regió mitja (*Ebro medio*) fins a l'embassament de Ribarroja i la fa començar a Conchas de Haro, a uns 25 km aigües avall de Miranda de Ebro.

El gruix de l'estudi l'ocupen els aforaments practicats a cadascuna d'aquestes tres regions on també es detalla els aprofitaments d'aigua que es coneixen, les concessions d'aigua realitzades, una memòria de les comunicacions existents i en projecte i una descripció de les aigües estancades que poden trobar-se⁴.

El reconeixement finalitza amb un resum final de totes les dades i s'adjunten dues làmines de gran format: la primera amb un gravat del pla general de la conca del riu Ebre i els seus afluents (que inclou una distribució de la geologia més representativa de cada àrea) i la segona amb un perfil general de l'Ebre i els principals afluents.

A la Taula 1 es mostren els aforaments complerts del reconeixement (és a dir, dels que el document n'inclou una descripció precisa). Els aforaments múltiples (e.g. aforaments propers aigües amunt i aigües avall de punts singulars, rius amb dues lleres ben diferenciades, etc.) s'especifiquen avall (* En els annexes D, E i F es completa la informació individual de cada aforament.

Taula 2). No obstant, existeix un últim perfil transversal de l'Ebre que no s'ha inclòs per no haver estat realitzat per D. Pedro Antonio però que es recull en el document. Dit perfil va ser pres amb motiu de la construcció del Pont del Ferrocarril a Tortosa (inaugurat l'any 1867).

Taula 1. Aforaments del reconeixement. Numeració de D. Pedro Antonio i ortografia corregida amb l'estudi de Galván Plaza (2009). De l'1 al 27: Regió superior. Del 28 al 91: Regió mitja. Del 92 al 129: Regió Inferior. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).*

1	Trisuerra	34	Ayuda	67	Larraun	100	Segre
2	Mazandrero	35	Zadorra	68	Lecumberri	101	Segre
3	Híjar (Ebre)	36	Inglares	69	Larraun	102	Balira
4	Villar	37	Inglares	70	Robo	103	Segre
5	Planchada	38	Glera	71	Salado	104	Salado
6	Parralozas	39	Glera	72	Irati	105	Noguera Pallaresa
7	Cruceo	40	Najerilla	73	Urrobi	106	Segre
8	Fontibre	41	Najerilla	74	Irati	107	Noguera Ribagorçana
9	Fontibre	42	Najerilla	75	Salazar	108	Cinca
10	Híjar (Ebre)	43	Ebre	76	Salazar	109	Segre
11	Izarilla	44	Iregua	77	Salazar	110	Balira
12	Virga	45	Iregua	78	Irati	111	Noguera Ribagorçana
13	Ebre	46	Lesa	79	Irati	112	Noguera Ribagorçana
14	Polla	47	Ebre	80	Esca	113	Cinca
15	Polla	48	Ega	81	Alhama	114	Cinca
16	Mardanchos	49	Ega	82	Queiles	115	Cinca
17	Arrocastro	50	Ega	83	Ebre	116	Ara

⁴ És interessant la inclusió de notícies o dades que es van anar recollint al llarg del trajecte. Per exemple, es fa ressò del nivell màxim al que va arribar l'aigua en un estretament al Segre: "el 23 de Mayo de 1853 se elevaron las aguas en él a 27 m. sobre el estiaje, según la señal que hay puesta en el segundo de los puentes".

18	Ebre	51	Urederra	84	Piedra	117	Ara
19	Rudrón	52	Urederra	85	Giloca	118	Natas
20	Homino (Mayor)	53	Urederra	86	Giloca	119	Ésera
21	Nela	54	Aragón	87	Manubles	120	Rialgo
22	Nela	55	Aragón	88	Jalón	121	Isábena
23	Jerea	56	Aragón	89	Jalón	122	Alcanadre
24	Ebre	57	Aragón	90	Canal de Tauste	123	Guadalope
25	Omecillo	58	Arga	91	Ebre	124	Algas
26	Oroncillo	59	Arga	92	Gállego	125	Nonaspe
27	Ebre	60	Arga	93	Gállego	126	Matarranya
28	Bayas	61	Arga	94	Gállego	127	Ebre
29	Zadorra	62	Arga	95	Segre	128	Ebre
30	Zadorra	63	Arga	96	Raur	129	Ebre
31	Ayuda	64	Arga	97	Segre	Regió superior	
32	Ayuda	65	Ulzama	98	Segre	Regió mitja	
33	Ayuda	66	Larraun	99	Segre	Regió inferior	

* En els annexes D, E i F es completa la informació individual de cada aforament.

Taula 2. Aforaments múltiples. Lleres dividides en dos braços, aforaments aigües amunt i aigües avall d'un punt singular, etc. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).

10	Híjar (Ebre)	3 aforaments: aigües amunt, aigües avall i secció del centre
22	Nela	2 aforaments: primer i segon braç
27	Ebre	4 aforaments: braç esquerre i dret, llera unificada aigües avall i canal que s'incorpora
28	Bayas	2 aforaments: de la mateixa secció amb cabals diferents
37	Inglares	2 aforaments: desguàs esquerre i dret
39	Glera	3 aforaments: braç principal, braç dret i sèquia Molinacho
70	Robo	2 aforaments: aigües amunt i aigües avall
71	Salado	2 aforaments: aigües amunt i aigües avall
82	Queiles	3 aforaments: aigües amunt, aigües avall i secció del centre
90	Canal Tauste	2 aforaments: aigües amunt i aigües avall
91	Ebre	2 aforaments: aigües amunt i aigües avall
116	Ara	2 aforaments: braç esquerre i dret
121	Isábena	3 aforaments: braç esquerre i dret i naixement de San Cristóbal

4.2 PRINCIPALS LIMITACIONS TÈCNIQUES I MANCANCES DEL RECONeixEMENT

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, la manca d'un pressupost generós i les pressions per a finalitzar l'estudi amb celeritat van tenir conseqüències en el seu resultat final. És d'esperar que fruit d'aquestes presses i mancances la instrumentària de la qual es va fer ús estigués condicionada i resultés poc sofisticada fins i tot per a l'època.

En aquells indrets on les dades topogràfiques eren escasses es van fer anivellaments⁵ per tal de determinar els pendents i tenir un coneixement aproximat de les vessants. Citant del propi D. Pedro Antonio els aforaments es van calcular de la següent manera: “por nivelación o, por sondeo con un sencillo aparato de cuerdas, de que iban provistas las brigadas; y la velocidad con flotadores, pero tomando también las pendientes del (sic) río, a fin de comprobarlas por el cálculo” (ibíd.).

L'ús de flotadors per al càlcul de la velocitat que permeti, un cop coneguda la secció mullada de la llera, determinar el cabal mitjà de la secció està sotmès a una sèrie d'errors, alguns intrínsecs al mètode. Tot i no disposar de dades que ho confirmin, s'espera que D. Pedro Antonio, coneixedor dels possibles defectes que el mètode del flotador podia presentar⁶, hagués corregit els valors de velocitat superficial obtinguts⁷. Si més no, gràcies a la memòria del reconeixement es coneix la metodologia que seguia sobre el terreny: llençava els flotadors sobre els filets d'aigua que, a simple vista, corresponien a la màxima velocitat del flux.

Avui en dia, la correcció per a obtenir la velocitat mitjana vertadera es realitza d'acord amb l'ajust a un perfil de velocitat logarítmic amb la profunditat (Figura 4). A efectes pràctics, això implica multiplicar la velocitat superficial obtinguda per un coeficient proper a 0.9.

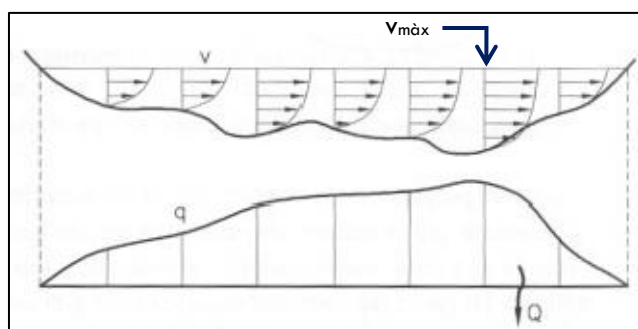


Figura 4. Distribució de velocitat i cabal unitari en un riu. S'assenyala la vertical en la que suposadament D. Pedro Antonio llençaria el flotador per a mesurar la velocitat. Font: modificat de Martín Vide (2002).

Les dificultats a l'hora d'aforar les seccions més cabaloses, profundes i amples van condicionar el nombre total d'aforaments. Per exemple “el Arr. Satorres (afluent del Segre), que no se pudo aforar por la gran profundidad de su (sic) cáuce pedregoso” (ibíd.) i segurament altres localitzacions en el curs de l'Ebre que haurien permès copsar de forma més completa la seva evolució des de la capçalera fins a la desembocadura.

⁵ Se suposa que van emprar baròmetres, tot i que es desconeix si eren de mercuri (amb més error) o aneroides (més precisos).

⁶ Al llarg de la memòria del reconeixement es poden trobar anotacions com la que es cita a continuació, a propòsit de l'aforament al riu Zadorra: “debe considerarse bajo por haber reinado durante la operación aire contrario a la marcha de los flotadores” (de Mesa Arroquia, 1865).

⁷ Tot i desconèixer si la velocitat que cita en el reconeixement és la que l'equip de D. Pedro Antonio va obtenir directament de la mesura de camp, sí que cita la fórmula de Eytelwein (1764-1848) per a fer uns càlculs comparatius de la velocitat de l'Ebre a Saragossa. L'expressió d'Eytelwein és:

$$v = 50.9 \cdot \sqrt{R_h \cdot S} \text{ (m/s)}.$$

Per últim, tot i coneguda la classificació general de l'Ebre com a riu de graves (Martín Vide, 2002), manca informació sedimentària que, entre d'altres, hauria permès una catalogació dels aforaments segons la mida dels materials de les lleres. A part de la descripció geològica general, es cita que la llera de l'Ebre és rocosa a la regió superior. Fent referència a la memòria del Sr. Leguiller sobre els treballs de canalització del riu, es troben detalls de les rescloses, els dics de gabions i els dragats de sorres i graves que s'han practicat, totes elles actuacions amb un impacte rellevant en el sediment de la zona involucrada.

4.3 L'ESTIATGE

Essent un dels objectius fonamentals poder descobrir la riquesa d'aigua aprofitable dins de la conca del riu Ebre, D. Pedro Antonio va realitzar el reconeixement de la vall en el període d'estiatge, és a dir, en època d'aigües baixes (de juliol a agost, malgrat els últims aforaments del reconeixement es podrien haver produït a principis d'octubre).

L'Ebre presenta un règim fluvial natural força complicat i heterogeni que pot definir-se com la combinació de tres tipus bàsics: en la capçalera predomina el règim pluvial oceànic, en el tram mig el pluvionival oceànic i en la regió inferior el pluvial mediterrani⁸. A més a més, aquesta varietat dificulta la tasca d'una descripció conjunta dels aforaments, en el benentès que provoca que l'estiatge es reflecteixi en els rius de manera diferent segons el seu origen. Per exemple, als afluents cantàbrics de l'Ebre, de règim oceànic, presenten un estiatge molt suau mentre que al propi Ebre, en la regió inferior, és molt acusat.

Actualment, però, la regulació a la que el riu és sotmès des de la capçalera (Embassament de l'Ebre) fins ben entrat en la regió inferior (embassaments de Flix o Mequinensa) ha modificat els hidrogrames (més endavant es comprova a les figures Figura 6 i Figura 7) amb totes les implicacions que aquest fet suposa.

4.3.1 L'ESTIATGE A L'ENGINYERIA

Aforar un riu en estiatge xoca amb moltes de les teories d'enginyeria fluvial on és ben conegut que són les aigües *altes* -aquelles que omplen la llera com a primera aproximació⁹- les principals responsables de la morfologia del riu (Figura 5). Algunes distorsions que cal tenir present com a

⁸ - Règim pluvial oceànic: presenten corbes molt semblants a les de precipitació, amb una aportació regular que presenta el mínim a l'agost i el màxim a l'hivern.
 - Règim pluvionival: les pluges són més importants que la neu. El mínim es produeix a l'estiu i el màxim a principis de primavera amb un segon màxim secundari a la tardor.
 - Règim pluvial mediterrani: aportació irregular amb un mínim molt acusat a l'estiu (juliol i agost) i un màxim a la tardor amb un màxim secundari a la primavera.

⁹ La definició d'un cabal principal responsable de modelitzar el riu no és trivial i diversos autors defenen diverses propostes. Una explicació del seu significat por llegir-se al llibre *Ingeniería de Ríos* de J.P. Martín Vide (2002).

conseqüència d'aquesta característica són, per exemple, les relacions amplada-calat, que poden ésser molt diferents entre aigües altes i baixes sobretot si el riu ha creat una llera particular per a cabals d'estiatge (que conforma el tàlveg en aigües altes). De fet D. Pedro Antonio fa esment a crescudes de l'Ebre que s'elevien fins 10 metres per sobre les aigües baixes. Aquest fet interfereix intensament en els resultats; no obstant, no impedirà l'obtenció de conclusions remarcables.

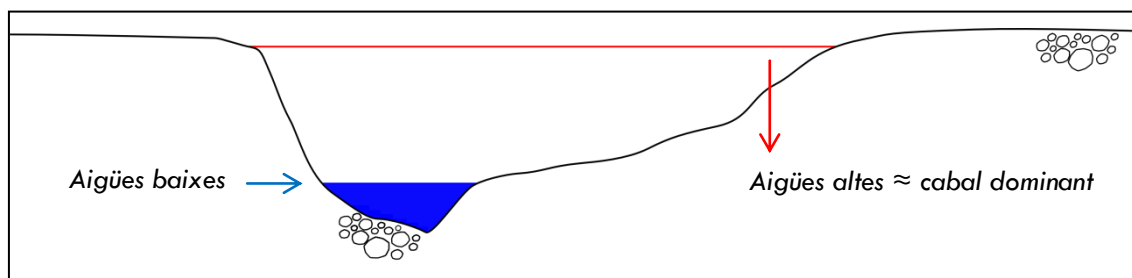


Figura 5. Aigües altes i aigües baixes en una llera tipus. No a escala. Font: elaboració pròpia.

L'estiatge també va imposar el seu full de ruta a D. Pedro Antonio, que observant com els afluents més cabalosos es localitzaven al marge esquerre va dedicar més temps a aquests rius “[...] cuyo caudal es superior á lo que puede consumirse en ella (la naturaleza) en peores condiciones!” (ibíd.). El catàleg és, per tant, més complert en aquest marge esquerre tot i el lament de D. Pedro Antonio, que veia com les terres més fèrtils i que més aigua necessitaven es trobaven en el cantó oposat.

Cert és que l'estiatge estudiat per D. Pedro Antonio “[...] no puede reputarse como de los (sic) mas estériles que se conocen en este río” (ibíd.) i que els últims aforaments realitzats a la part final de l'Ebre bé no podrien correspondre a l'estricta estiatge del riu per haver-los realitzat possiblement a l'octubre (Galván Plaza, 2009), però els cabals d'estiatge a Saragossa i Tortosa que fixa en 28 i 136 m³/s respectivament són del mateix ordre de magnitud que els actualment acceptats com a cabals ecològics o mínims en aquestes localitzacions pel Pla Hidrològic de la Conca (30 i 100 m³/s per a Saragossa i a la desembocadura respectivament) (Real Decreto de l'aprovació dels Planes Hidrológicos de Cuenca, 1998).

Els inconvenients es minimitzen si es posa en context l'estiatge de l'Ebre amb l'estudi dels cabals ecològics o de manteniment¹⁰, que atorga a les dades una vàlua afegida. Tal i com s'aprofundirà més endavant, un dels mètodes per a determinar el cabal ecològic del riu parteix de l'observació de la variació del perímetre mullat amb el cabal. Per tant, disposar de mesures de les seccions transversals resulta fonamental. A més, els resultats que es poden obtenir corresponen al riu en estat natural, sense patir les regulacions actuals (subministrament d'aigua, aprofitaments hidroelèctrics, etc.) que malauradament modifiquen de manera significativa la

¹⁰ Tot i significar pràcticament el mateix, la nomenclatura és variada: cabal ambiental, ecològic, de manteniment, recomanat, reservat o mínim

forma de l'hidrograma del riu (Figures Figura 6 i Figura 7) i que poden tenir conseqüències greus sobre la vegetació autòctona i la fauna de la zona afectada.

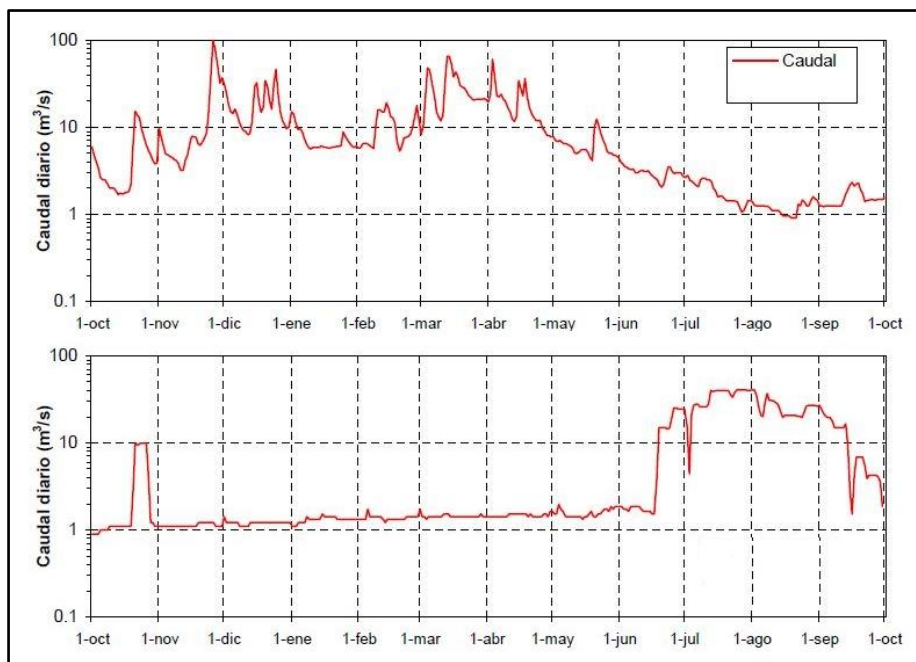


Figura 6. Hidrogrames diaris de l'Ebre a Arroyo abans (amunt, any 1943) i després (avall, any 1997) de la construcció de l'Embassament de l'Ebre. Eix vertical en escala logarítmica. Font: CHE (2006).

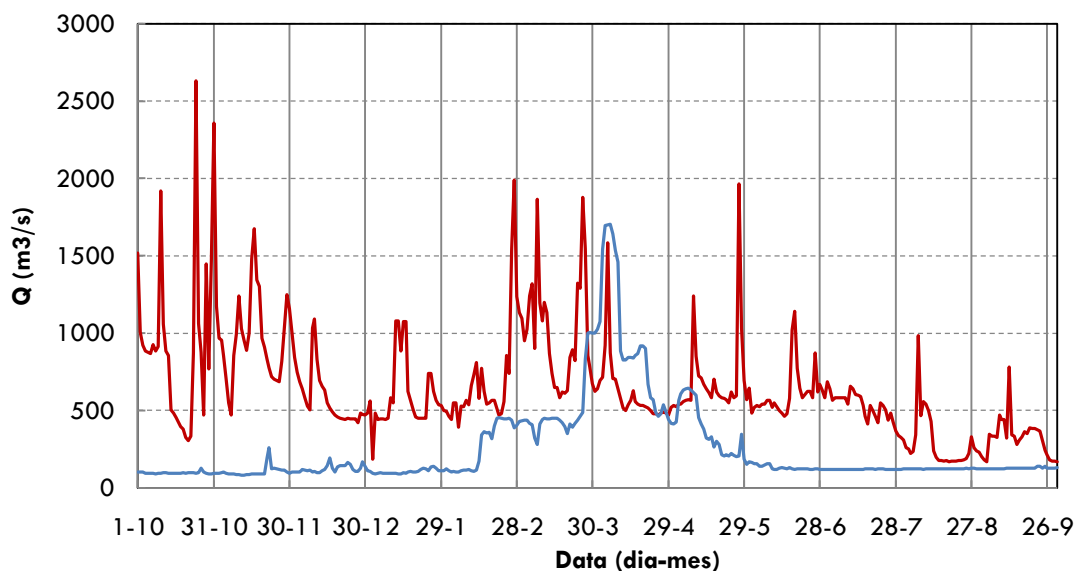


Figura 7. Hidrogrames diaris combinats de dos anys hidrològics (de setembre a octubre) de l'Ebre a Tortosa. En vermell: oct. 1912 fins set. 1913 quan encara no s'havia construït cap gran presa a la conca fluvial de l'Ebre. En blau: oct. 2006 fins set. 2007 representatiu de l'actualitat, amb un riu Ebre fortament regulat sobretot en el seu tram inferior (embassaments de Mequinensa, Ribarroja, etc.). Es vol fer notar el canvi en la variabilitat dels cabals; el decreixement del cabal total aforat pot ésser degut a diversos factors no avaluats en aquest treball. Font: elaboració pròpia a partir de dades del CEDEX (<http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>).

Les diferències en el règim del riu són fàcilment identificables en els hidrogrames de dues localitzacions molt allunyades: primer a la regió superior en la capçalera i segon a Tortosa, en

el tram final abans de desembocar al Mediterrani. La variabilitat dels cabals cau dràsticament amb la construcció dels embassaments. Fou sobretot en les dècades dels anys quaranta, cinquanta i seixanta quan els grans embassaments van ésser construïts i quan el riu més se'n va ressentir.

L'anàlisi dels cabals de manteniment obtinguts en estudiar l'estiatge, plasmat en el reconeixement, es pot emprar en recomanacions per establir unes aportacions mínimes absolutes. L'actual regulació que es practica en el riu hauria de complir-les per tal de no subministrar cabals inferiors.

4.4 L'ENGINYERIA DE RIUS DEL RECONeixEMENT HIDROLÒGIC DE D. PEDRO ANTONIO

Ja s'ha comentat anteriorment com, des del punt de vista exclusivament de l'enginyeria fluvial, el fet d'aforar el riu únicament en el seu estiatge pot minvar les expectatives de l'anàlisi posterior que es pugui realitzar.

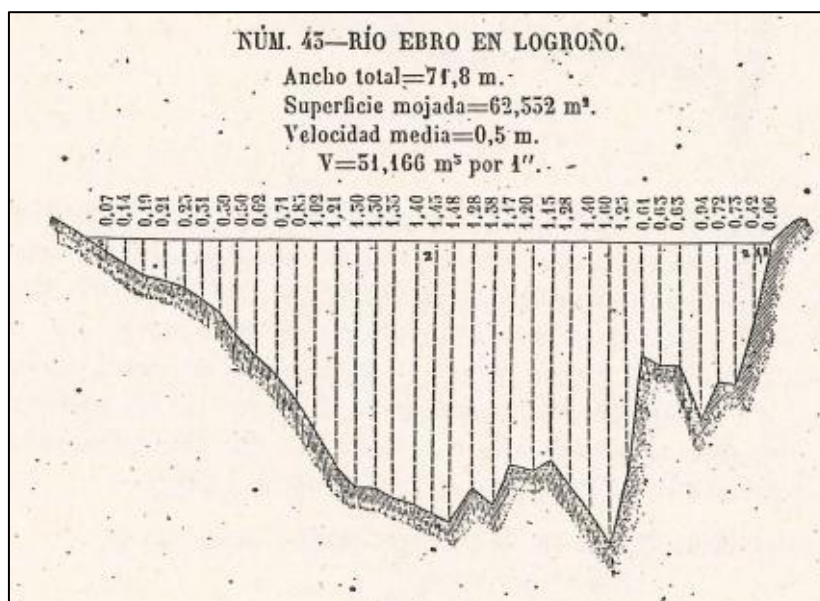


Figura 8. Exemple d'una secció transversal tipus dibuixada al Reconocimiento Hidrológico del valle del Ebro. S'observen les dades especificades: B , A , v_m , Q com producte de $A \cdot v_m$ i l'equidistància entre les mesures de la profunditat. Les variables s'expressen en el Sistema Internacional d'Unitats. Font: De Mesa Arroquia (1865).

Tot i així, D. Pedro Antonio va realitzar un treball excel·lent del que es pot extreure una gran quantitat d'informació que, un cop tractada, és útil per a diversos propòsits dins del camp de la hidràulica de rius naturals.

Les dades fonamentals que s'han extret són les que proporcionen cadascun dels gravats que representen els principals aforaments realitzats (Figura 8), 148 en total. Aquestes dades

corresponen a les diferents profunditats al llarg de la secció transversal separades per equidistàncies variables segons el cas, als valors de l'amplada total de llera, a la superfície mullada, a la velocitat mitjana i al cabal resultant del producte d'aquestes dues últimes magnituds, tot descrit en el sistema internacional d'unitats. Del perfil longitudinal de la conca fluvial -annex al document- s'han extret tots els pendents necessaris per a càlculs més precisos, ja que D. Pedro Antonio únicament n'especifica els més representatius de cadascuna de les tres regions en les que divideix l'Ebre.

Tota la informació restant, incloent-hi les dades referents a la geologia, la infraestructura, els aprofitaments, els regs i demés, no ha estat tractada i únicament se n'ha fet un ús purament descriptiu.

4.5 TRACTAMENT DE LES DADES

Tota la informació citada a l'apartat anterior ha estat digitalitzada per tal de facilitar l'anàlisi. La depuració i filtratge d'errors s'ha aconseguit realitzant senzilles operacions aritmètiques que permeten comparar els valors obtinguts amb els que D. Pedro Antonio descriu en el reconeixement¹¹.

De la mateixa manera, s'ha creat un model mitjançant el software de simulació hidràulica HEC-RAS v4.0, que inclou tots els aforaments coneguts. Cadascun dels aforaments és tractat com un tram de riu independent a la resta amb uns pendents segons el perfil longitudinal, annex al document, i uns coeficients de Manning que s'han calibrat per tal d'ajustar-se a la realitat observada. El model ha estat calculat amb règim permanent gradualment variat.

4.6 INFORMACIÓ COMPLEMENTÀRIA

4.6.1 GRANULOMETRIA

Per tal de completar la base de dades s'han incorporat les dades granulomètriques de l'Ebre en tres trams: en el seu pas per Saragossa (regió mitja), a prop de la localitat d'Ascó i a Mora d'Ebre (totes dues a la regió inferior). També s'han inclòs granulometries del riu Aragon (un dels principals afluents de l'Ebre) en el tram proper a la desembocadura de l'Arga, de l'Arga des de 15 km aigües amunt de la seva confluència amb l'Aragón i del riu Gállego en tot el seu tram inferior.

¹¹ La presència de correccions escrites a mà ja en el document original fa que les comprovacions siguin necessàries per eliminar incongruències en el text.

Tot i ésser escasses, les dades han servit per estimar el d_{50} i el d_m per a cadascuna de les regions en les que s'ha dividit la conca de l'Ebre. Així mateix, s'han tingut en compte estudis de l'evolució aigües avall de la mida del material de la llera (e.g. Knighton (1980) citat a Knighton (1999) proposa una funció exponencial negativa) per a oferir una aproximació més real.

A la manca de dades disponibles, cal afegir la dificultat de caracteritzar granulomètricament els rius de graves —són els que componen la conca de l'Ebre— per l'ampli rang de diàmetres que s'hi pot trobar en general i a la variabilitat tant en superfície com en profunditat, essent el cuirassament un dels processos més remarcables.

Al llarg de la tesina es considera que d_m i d_{50} representen el mateix valor tot ésser conceptes diferents: d_m és el diàmetre mitjà del material de la llera (la mitjana aritmètica) mentre que d_{50} coincideix amb la mediana de la distribució dels diferents diàmetres del material de la llera.

Taula 3. Granulometria acceptada per a la conca del riu Ebre. Font: elaboració pròpia.

d_{50} (mm)	
Superior	40
Regió Mitja	25
Inferior	15

Una estratègia per a determinar la granulometria en els aforaments de D. Pedro Antonio sorgeix de la fórmula semiempírica d'Strickler per al coeficient de rugositat de Manning (d_{50} s'introdueix en metres):

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{6.7 \cdot \sqrt{g}} \Rightarrow d_{50} = (6.7 \cdot \sqrt{g} \cdot n)^6 \quad [1]$$

n és el coeficient de Manning per a les condicions particulars de disseny¹² (-)

Els resultats, però, semblen no ajustar-se gaire a la realitat. L'ampli rang de valors comprèn diàmetres mitjans des d'una sorra molt fina (0.086 mm) fins a mides exageradament grans (de l'ordre de magnitud de 10^6 m). El que indiquen és que la rugositat del fons de la llera no només la componen les partícules, sinó que cal considerar les formes de fons i la vegetació. La seva anàlisi, però, queda fora de l'abast d'aquest treball d'acord amb les dades d'origen.

La manca d'una evolució decreixent en la mida de les partícules (e.g. la distribució dels diàmetres mitjans obtinguts a l'Ebre és absolutament caòtica) acaba portant a desestimar aquest mètode per a la prognosi dels d_{50} a la llera en favor dels valors proposats a la Taula 3.

4.6.2 AFORAMENTS ACTUALITZATS

¹² Els coeficients de Manning s'han obtingut mitjançant l'ajuda del software HEC-RAS (v.4.0) per al règim permanent i gradualment variat amb les condicions de contorn de calat normal. El model ha estat emprat alhora per a la validació de les dades, tal i com s'explica en posteriors apartats.

De la mateixa manera, per a establir una relació directa entre els resultats obtinguts en el reconeixement del segle XIX amb l'estat del riu i dels afluent en l'actualitat, s'han buscat aforaments amb mesures de la secció transversal practicats a la conca de l'Ebre.

La dificultat rau en trobar seccions recents properes a les localitzacions on D. Pedro Antonio va fer els aforaments, algunes de les quals, malgrat l'explicació donada al reconeixement, no es localitzen en l'actualitat (Galván Plaza, 2009).

La multitud d'actuacions que s'han realitzat a la vall de l'Ebre també dificulten una comparació real. Segurament, per la seva magnitud i per les alteracions que suposa en el règim d'un riu i en el medi que l'envolta, la construcció d'embassaments en el curs de l'Ebre i alguns dels seus afluent són les transformacions més importants que el riu ha experimentat. Tal i com diversos autors han estudiat i fan constar en diferents articles, es calcula que el transport de sediments en suspensió a la part baixa del riu ha disminuït fins a representar un migrat 5% del que el riu transportava abans de la construcció de les preses (Palanques i Guillén, 1992). Són també destacables les alteracions introduïdes pels talls de meandre practicats, els endegaments de diversos trams o la construcció de ponts (e.g. el citat *Pont del Ferrocarril*).

Amb tot, es disposa de dades complertes d'aforaments actuals realitzats al riu Gállego, Arga i Aragón en trams on es pot trobar una correlació amb el treball de camp de D. Pedro Antonio. És a dir, corresponen a seccions transversals en punts propers als de D. Pedro Antonio a on no s'hi han realitzat actuacions que modifiquin substancialment la llera¹³.

4.7 COMPENDI DE LA INFORMACIÓ TRACTADA

El volum de dades disponible es resumeix de la següent manera (Taula 4):

Taula 4. Resum de la informació base d'aquesta tesina. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).

Reconocimiento hidrológico del Valle del Ebro	Núm. d'aforaments amb dibuix de la secció	129 (148 (a))
	Dels quals corresponen:	
	- Regió superior	27 (33)
	- Regió mitja	64 (73)
	- Regió inferior	38 (42)
	Per a cada secció s'ha introduït:	
	- Una mesura de la velocitat (v_m).	
	- Una mesura de l'amplada (B).	
	- Una mesura de la secció mullada (A)	
	- Una dada del cabal ($Q = v_m \cdot A$)	

¹³ Es disposa d'aquesta informació actual gràcies als treballs del grup de recerca del Departament d'Enginyeria Marítima, Hidràulica i Ambiental. Els treballs tenen per títol: *Estudio morfodinámico del río Arga como consecuencia de su canalización* (2010), *Estudio de la dinámica fluvial del río Aragón en Caparroso* (2009) i *Estudio hidráulico y morfodinámico del río Gállego en Zaragoza* (2005).

	Equidistàncies entre mesures de profunditats	[0.3 – 4.9] m
	Núm. total de profunditats avaluades	2140 aprox.
	Afluent de l'Ebre amb aforament 65 (més 1 sèquia i 2 canals) dels 132 coneguts.	
	Làmina amb el perfil longitudinal de la conca de l'Ebre	
	- 43 pendents en el curs de l'Ebre (Desnivell/Distància recorreguda)	
	Làmina amb el mapa de la localització dels aforaments.	
Altres	Model en HEC-RAS del Gállego a prop de la desembocadura.	
	Model en HEC-RAS de l'Aragón al seu pas per Caparroso.	
	Sèrie de seccions transversals en el tram de confluència entre l'Arga i l'Aragón.	
	Granulometries	
	- Ebre a Saragossa, Ascó i Mora d'Ebre.	
	- Aragón i Arga en trams propers a la seva confluència.	
	- Gállego a Saragossa.	

(a) En el document es recullen dades de 231 aforaments però únicament són 129 els que es mostren detalladament (dibuix de la secció, velocitat, etc.). Alguns d'aquests aforaments són múltiples (e.g. el riu s'afora aigües amunt i aigües avall d'un punt singular o presenta dos braços ben diferenciats) que sumen fins a 148 el número total d'aforaments practicats.

4.8 L'EBRE DE FINALS SEGLE XIX EN DADES

A continuació es resumeixen els valors més representatius de la conca del riu Ebre tal i com consten en el reconeixement de D. Pedro Antonio i es contrasten amb les dades actuals (entre parèntesi) que principalment proporciona la *Confederación Hidrográfica del Ebro* (CHE) en el seu portal d'Internet. Les dades de transport sòlid en suspensió s'obtenen gràcies al treball d'investigació de Palanques i Guillén (1992) sobre l'estimació de Gorria (1880).

Taula 5. Dades bàsiques del reconeixement de D. Pedro Antonio durant l'estiatge de 1863. Entre parèntesi les dades actuals que ofereix la CHE o altres fonts fiables. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).

Longitud	Vall de l'Ebre des de Peña Labra fins l'Illa de Buda	520	Km
	riu Ebre	900	Km (910.5 Km (a))
	- Regió superior des de l'origen fins a Miranda	194	Km
	- Regió mitja des de Miranda fins a Saragossa	325	Km
	- Regió inferior des de Saragossa fins a la desembocadura	381	Km
Superfície de la conca	Regió superior	5453	Km ²
	Regió mitja	32475	Km ²
	Regió inferior	45602	Km ²
	Total	83530	Km ² (85534 Km ² (a))

Pendents generals riu Ebre¹⁴ [Pendents mitjans riu Ebre]	Regió superior	0.00287	
		[0.00320]	
	Regió mitja	0.00075	
		[0.00071]	
	Regió inferior	0.00052	
		[0.00032]	
	General vall de l'Ebre	0.0011	(0.00229 (b))
Aportació de la vall a l'estiatge de 1863	Ebre	2.3	m ³ /s
	Aragón	13.4	m ³ /s
	Jalón	8.7	m ³ /s
	Gàllego	17.7	m ³ /s
	Segre	155.2	m ³ /s
	Altres	79.3	m ³ /s
	Total	274.3	m ³ /s
Cabal a Tortosa		136 m ³ /s	
		(275.4 - 125.2 m ³ /s (c))	
Transport sòlid en suspensió		20-25 · 10 ⁶ Tn/any	
		(2 · 10 ⁵ Tn/any (d))	
Concentració sòlids en suspensió		700-1700 mg/l	
		(15 mg/l (d))	
Superfície de regadiu		159516 ha (e)	(783948 ha)
Consum en regadius/agricultura		3107 hm ³ /any	
		(4971 hm ³ /any (f))	

(a) L'increment és degut a que actualment l'origen de l'Hijar-Ebre és considerat aigües amunt de la confluència del Trisuerra i Mazandrero, on D. Pedro Antonio va fixar-lo (Fernández Rodríguez, 2008). La fotografia de l'origen segons D. Pedro Antonio es pot observar a l'Annex F.

(b) Si es té en compte el naixement del Trisuerra (a 2102 msnm.) a l'hora de determinar el pendent mitjà el seu valor és de 0.00233, més proper a l'actual mitjana considerada malgrat la divisió en regions recent (Ollero et al., 2004) força diferent de la presentada per D. Pedro Antonio.

(c) Valors corresponents a les mitjanes dels mesos de juliol, agost i setembre dels anys hidrològics 1912/13 - 1921/22 (pel primer valor) i 1997/98 - 2006/07 (pel segon).

(d) Correspon a l'1% del transport de finals de segle XIX. La construcció de preses és la raó fonamental (Palanques i Guillén, 1992).

(e) Aquest valor difereix de les dades oficials del Registre de Propietat, que xifra en 225674 ha la superfície de regadiu.

(f) Dada del *Plan Nacional de Regadíos* del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (<http://www.mapa.es/es/desarrollo/pags/pnr/principal.htm>).

¹⁴ Els pendents generals resulten de dividir la diferència de cotes entre la longitud del riu per a la regió corresponent. Els pendents mitjans s'obtenen al calcular la mitjana geomètrica dels pendents dels diversos trams en els que s'ha dividit el riu Ebre en la regió corresponent.

5 LA TEORIA DEL RÈGIM

5.1 INTRODUCCIÓ

L'extens i complet catàleg que D. Pedro Antonio va compendiar en el reconeixement amb l'objectiu de determinar la riquesa d'aigua de la conca de l'Ebre en època d'estiatge, conté intrínsecament la possibilitat d'avaluar les diverses seccions transversals des d'un punt de vista global, o dit d'una altra manera, permet estudiar l'Ebre i els seus afluents com integrants d'un sistema estable que amb el pas dels segles ha anat adaptant-se al medi fins desenvolupar les formes i dimensions observades. És aquesta segona idea la que va donar peu a la teoria del règim.

El concepte de règim és aquell relacionat amb equilibri o balanç i es pot classificar el seu estudi per l'aproximació que emprà:

- Mètodes desenvolupats a partir d'una base de dades extensa i observacions directes, realitzant una anàlisi des d'un punt de vista purament empíric.
- Un segon corrent investigador més modern que obté les relacions a partir d'una aproximació analítica, des d'equacions fonamentals de l'enginyeria fluvial (flux volumètric, resistència al flux, transport de sediments, etc.) i tenint cura de l'anàlisi dimensional.

Aquesta divisió sembla haver decantat els investigadors per definir com a teories del règim les exclusivament empíriques. En canvi, però, les teories fonamentades en conceptes teòrics de la hidràulica i/o semiempíriques adopten noms més generals com *geometria hidràulica*.

Kennedy va ser un dels pioners a l'estudiar en canals artificials de sorra construïts a l'Índia l'any 1895 els paràmetres que permetessin establir i identificar relacions per al disseny d'una nova xarxa de canals no revestits. La clau de l'operació rau en el fet que els canals que estudiava estaven en funcionament des de força temps enrere i, per tant, s'havien ajustat a unes dimensions estables en funció del cabal líquid i sòlid que transportaven (Maza i García, 1996). No va ser fins vint anys més tard, però, quan Lindley va emprar el concepte de *règim* per primera vegada per referir-se a aquest *equilibri* que coincideix amb el concepte d'*estabilitat dinàmica*. És a dir, els cabals, el sediment, la planta, els marges, etc., no canvien apreciablement d'any en any.

La fórmula pionera que Kennedy va proposar [2] ressaltava la relació mantinguda entre la velocitat mitjana i el calat de la següent forma:

$$v_m = 0.55 \cdot y^{0.64} \quad [2]$$

On el significat de les variables és:

v_m velocitat mitjana de la corrent (m/s)

y calat (m)

Des d'aleshores, la teoria ha estat contínuament actualitzada i diversos autors s'han aventurat en oferir nombroses contribucions per obtenir relacions més complertes i de major aplicabilitat: Lacey (1929), Lane (1937), Blench (1941), Simons i Albertson (1963), Altunin (1962) o més recentment Julien i Wargadalam (1995) i Parker (2007), entre molts altres.

És generalment acceptat que la geometria hidràulica es pot descriure simplificadament en funció del cabal dominant, l'amplada, el calat mitjà, la velocitat mitjana i el pendent. Sovint, moltes de les relacions geomètriques hidràuliques que en sorgeixen d'aquests paràmetres es descriuen en termes del cabal dominant, emprat com a variable independent. En canvi, són poques les que incorporen la mida del material de la llera i el transport de sediment o el paràmetre de Shields com a segona i tercera variables independents, magnituds que alguns autors consideren determinants. La rellevància de cadascun de les magnituds en els diferents mètodes es tractarà de forma independent més endavant.

5.2 RESTRICCIONS

Degut a la seva naturalesa empírica, el desenvolupament de les equacions està subjecte a unes característiques inherents al riu o la base de dades que s'estudia. Així doncs per a poder extrapolar els resultats s'ha de realitzar dins d'un marc on les condicions on es vol aplicar la teoria del règim siguin similars a les del riu o sistemes fluvials originals. Aquesta limitació obliga a l'enginyer a conèixer l'interval de valors dins del qual pot treballar i supeditar en tot moment els resultats al raonament que ha conduït cap a la formulació de les equacions emprades. En aquest sentit, a la Taula 6 es mostren els valors mitjans¹⁵ i els rangs obtinguts dels aforaments practicats per D. Pedro Antonio classificats per regions.

La progressió creixent de les magnituds -fins i tot de la velocitat malgrat la disminució del pendent aigües avall (Leopold, 1953)- a excepció del pendent des de la regió superior fins a la inferior és la típica en rius naturals. El motiu pel qual el pendent mitjà augmenta en la regió

¹⁵ Les mitjanes al llarg d'aquesta tesina, sempre i quan no es digui el contrari, corresponen a la definició de **mitjana geomètrica**. La majoria dels aforaments presenten unes magnituds petites enfront d'una minoria amb magnituds relativament grans, fet que recomana adoptar aquesta variable estadística pel càlcul de la mitjana.

inferior és com a conseqüència de la influència dels pendents dels afluents de l'Ebre aforats en aquesta regió. A més a més, s'ha tenir en compte que el riu Ebre fins a la seva desembocadura encara travessa sistemes muntanyosos com les Serralades Costaneres Catalanes entre Xerta i Miravet que fan augmentar el pendent mitjà.

Taula 6. Valors mitjans i rangs de les diferents variables que intervenen en els aforaments. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).

Paràmetre		Regió			Mitjana global	Rang global
		Superior	Mitja	Inferior		
Amplada	B (m)	9.33	11.7	22.39	13.32	de 1.50 fins 118.00
Calat mitjà	y_m (m)	0.29	0.31	0.41	0.33	de 0.09 fins 2.52
Pendent	S (-)	0.00498	0.00338	0.00426	0.00416	de 0.00025 fins 0.09283
Cabal líquid	Q (m ³ /s)	1.16	1.49	6.13	2.09	de 0.02 fins 136.02
Velocitat mitjana	v_m (m/s)	0.42	0.41	0.67	0.47	de 0.07 fins 1.48

A mode descriptiu es mostra una secció transversal de l'aforament del reconeixement de dimensions que més s'aproximen a mitjanes geomètriques de les diferents variables (Taula 6). S'acompanya de la secció transversal del reconeixement de dimensions més properes a les mitjanes aritmètiques per tal de ressaltar la diferència i la importància en la determinació de la mitjana idònia.

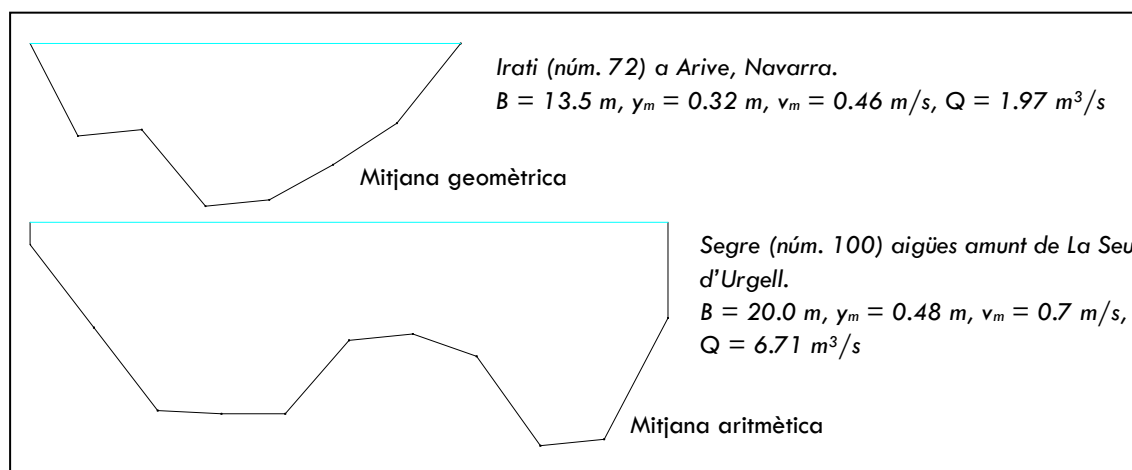


Figura 9. Amunt: secció de dimensions més properes a les mitjanes geomètriques de tots els aforaments. Avall: secció de dimensions més properes a les mitjanes aritmètiques de tots els aforaments. Es vol fer notar que la mitjana aritmètica proporciona unes magnituds similars a les d'una secció transversal a la regió inferior; la mitjana geomètrica les proporciona a la regió mitja. Font: elaboració pròpia a partir de dades de Mesa Arroquia (1865).

Tal i com s'ha fet esment anteriorment, per explotar les màximes possibilitats de la teoria s'haurien d'utilitzar els cabals dominants.

Clàssicament es poden recomanar les següents característiques que haurien de satisfer els rius als quals s'hi vol aplicar la teoria del règim:

- Rius sorrencs.
- Material transportat fi i concentracions inferiors als 500 mg/l.
- Llera ampla ($B/y > 3$), ampla i hidràulicament llisa.
- Règim lent.

Ara bé, també han estat utilitzades dades obtingudes en rius que no compleixen amb el citat anteriorment, el que obliga a posar especial èmfasi en definir els rangs d'aplicabilitat de cada teoria en particular. Per exemple, Altunin i el mètode que va presentar el 1962 desenvolupat exclusivament a partir d'observacions fetes en lleres amb material granular gruixut, el treball de Simons i Albertson amb dades de l'Índia i els Estats Units, més recentment el mètode de Julien i Wargadalam obtingut a partir de quatre equacions fonamentals i validat mitjançant una complerta base de dades, i finalment Parker *et al.*, que desenvolupen unes fórmules semiempíriques *quasi universals* a partir d'informació de rius exclusivament de grava i en fa un estudi de les implicacions físiques que comporten.

El fet que en els seus orígens la teoria del règim s'estudiés únicament en canals artificials de terra condiciona la seva aplicabilitat en molts rius de la península Ibèrica, on la majoria de rius són de grava (Martín Vide, 2002). Les implicacions de treballar amb un riu de grava respecte d'un de sorra són importants i expliquen el perquè és fonamental conèixer el rang d'aplicabilitat dels diferents mètodes exposats. Un resum de les característiques més importants és el següent (ibíd.):

- En un riu de grava es produeix acuirassament (en un riu de grava hi ha tant sorres com grava).
- En un riu de grava no es produeixen tan acusadament mesoformes (formes de fons), que sí s'observen en rius de sorra. Els rius de grava presenten formes de gran escala.
- La tensió crítica (llindar del moviment) per al transport de grava de la llera s'assoleix aproximadament amb la llera plena.

En el cas de l'Ebre, varies de les característiques de la conca del riu expliquen l'elevat transport en suspensió de finals segle XIX i es poden resumir com (Palanques i Guillén, 1992):

1. Pronunciat relleu en la capçalera dels afluents.
2. Existència de grans extensions desforestades.
3. Intenses precipitacions que afecten esporàdicament a àmplies zones de la conca.

Un altre inconvenient pràctic en les diverses teories del règim publicades és la manca d'un acord o conveni per a establir les variables que defineixen la secció. La superfície mullada les relaciona d'acord amb l'expressió [3].

$$A = PR_h = By_m = b_m y \quad [3]$$

On el significat de les variables és:

P	perímetre mullat (m)
R_h	radi hidràulic (m)
B	amplada de la superfície lliure del corrent (m)
y_m	calat mitjà (m) obtingut al dividir l'àrea entre l'amplada (A/B)
y	calat mesurat del fons a la superfície (m)
b_m	amplada mitjana de la secció (m) obtingut en dividir l'àrea entre el calat (A/y)

5.3 APLICACIÓ DE LA TEORIA DEL RÈGIM

Martín Vide (2002) resumeix la utilitat de la teoria del règim en lleres i endegaments de dues maneres:

- Enfocada cap al disseny d'un endegament estable (equilibri dinàmic).
- Com a eina per estimar les tendències d'inestabilitat d'un endegament existent. Per exemple, valors majors de calat que el projectat obtinguts per fórmules de règim indica una erosió de fons a termini mitjà.

És aquesta segona idea cap a on s'orienta l'aplicació dels diferents mètodes proposats, malgrat que a l'hora de pronosticar les tendències en el comportament de l'Ebre i els seus afluents cal considerar si no és l'efecte de disposar exclusivament d'aforaments en estiatge la causa de les suposades inestabilitats.

La primera utilitat s'empra a l'hora de definir les formes de les seccions estables abocades pels diferents mètodes. La forma de llera representativa adoptada en aquest treball és la trapeziforme amb talussos de pendent 1.5:1.

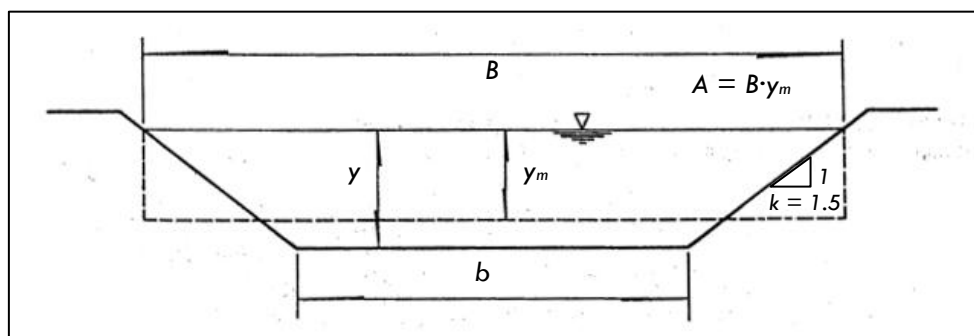


Figura 10. Llera trapeziforme adoptada com a model pel disseny de les seccions estables predites pels diferents mètodes. Font: modificat de Maza i Gacía (1996).

La profunditat màxima i l'amplada mitjana queden definits per la geometria trapezoidal com:

$$y = \frac{B}{2 \cdot k} \pm \left[\left(\frac{B}{2 \cdot k} \right)^2 - \frac{A}{k} \right]^{0.5} \quad [4]$$

$$b = B - 2 \cdot k \cdot y \quad [5]$$

En rius naturals la variabilitat en el transport líquid i sòlid pot provocar que no s'arribi a una situació de règim d'equilibri dinàmic tot i l'ajust constant del riu cap aquesta condició. Es pot parlar, per tant, de *quasiequilibri* i l'aplicació dels diferents mètodes a l'Ebre es realitza per obtenir un major coneixement del riu en aigües baixes així com per a observar el comportament de les equacions presentades, estudiant les concordances entre les prediccions que aboca la teoria i la realitat que D. Pedro Antonio va captar.

La metodologia seguida consisteix en definir en primer lloc les característiques bàsiques de cada teoria i mostrar la lògica fonamental que els autors han seguit per arribar a la formulació final. A continuació es realitza una valoració conjunta de les teories estudiades i finalment s'exposen els resultats i la seva discussió.

5.3.1 MÈTODES SELECCIONATS: MOTIUS I CONDICIONANTS

Entre tota la literatura existent, els mètodes de la teoria del règim desenvolupats en els següents apartats són els proporcionats per Simons i Albertson (1963), Altunin (1962), Lee i Julien (2006) a partir de Julien i Wargadalam (1995) i Parker *et al.* (2007) d'on s'aprofundeix en les adimensionalitzacions que es proposen.

El motiu fonamental de la seva elecció és la inclusió dins del rang d'aplicabilitat les lleres amb material gruixut (graves i rocs). És així ja que la granulometria adoptada per l'Ebre, amb valors del diàmetre mitjà estimats compresos entre 20 i 40 mm, compleix amb escreix aquesta condició.

La condició d'incloure dades corresponents a la condició de llera plena és omesa per raons òbvies, ja que les úniques dades que se'n disposa descriuen la situació del riu en aigües baixes. A efectes pràctics significa que les seccions aforades per D. Pedro Antonio són interpretades per les diferents equacions dels mètodes com si presentessin unes dimensions corresponents a la llera plena o amb cabal dominant (Figura 11). És tasca d'aquest treball desxifrar com influeixen aquests contratemps i obtenir les conclusions pertinents.

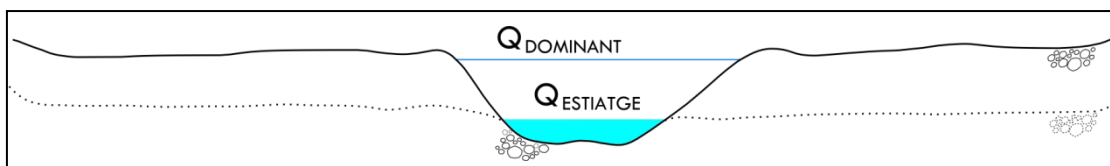


Figura 11. Cal tenir present que els mètodes consideren la secció mullada que ocupa el cabal en estiatge com la corresponent al cabal dominant, és a dir, com si els marges fossin els puntejats.
Font: elaboració pròpia.

Nogensmenys, totes les dades dels aforaments introduïdes en cadascun dels mètodes es troben dins dels diferents rangs fixats pels seus autors. És important cenyir-se als diferents rangs en tots els paràmetres i no únicament en el referent a *rius de sorra* o *rius de grava*. Per exemple, a partir de pendent majors de 0.03 (Montgomery i Buffington, 1997, citat a Chin i Wohl, 2005)

es poden trobar les seqüències en graons (*steep-pool*) que comporten una morfologia ben diferent a la del mateix riu circulant per una zona de planura.

En particular, els calats poc profunds, les velocitats extremadament lentes o els pendents elevats a les capçaleres dels afluents de l'Ebre en alguns aforaments són susceptibles de quedar fora del rang d'aplicació dels mètodes.

5.3.1.1 Sistema Internacional d'Unitats

Tal i com s'observarà, algunes de les equacions presentades no són dimensionalment homogènies degut al caire pràctic de les metodologies. No obstant, caldrà introduir les variables en el *Sistema Internacional d'Unitats*.

Per a no omplir les expressions de lletres i símbols que entorpeixin la lectura, només es mostren les definicions i les unitats de les variables quan apareixen per primera vegada. En el *Glossari* es pot consultar el llistat de les variables i els coeficients emprats amb les seves respectives unitats.

5.4 MÈTODE DE SIMONS I ALBERTSON

Presenten les equacions el 1963 amb dades obtingudes a l'Índia i als Estats Units. Estan motivats per la incapacitat dels mètodes de règim previs i són crítics amb el limitat del rang de condicions on es poden aplicar i amb el menyspreu de la importància del sediment transportat. Amb la seva recerca estenen el camp d'aplicació i conclouen que es poden distingir fins a cinc tipus de canals diferents:

1. Fons i marges de sorra.
2. Fons de sorra i marges cohesives.
3. Fons i marges cohesives.
4. Fons i marges amb material gruixut no cohesiu.
5. Igual que 2 però amb una càrrega de sediments elevada (entre 2000 i 8000 mg/l).

En aquesta introducció al mètode només es mostren les equacions amb els coeficients que corresponen a un *canal amb material gruixut no cohesiu*, característiques similars a les de l'Ebre i els seus afluents. El seu origen és purament empíric, resultat d'observacions dels autors. Les equacions es resumeixen com:

$$P = 3.16 \cdot Q^{0.512} \quad [6]$$

$$R_h = 0.27 \cdot Q^{0.361} \quad [7]$$

$$B = 1.087 \cdot b_m + 0.663 \text{ amb } b_m = 0.9 \cdot P \quad [8]$$

$$y = \begin{cases} 1.21 \cdot R_h, & R_h \leq 2.1 \text{ m} \\ 0.93 \cdot R_h + 0.61, & R_h > 2.1 \text{ m} \end{cases} \quad [9]$$

Per a obtenir el pendent i la velocitat mitjana es recomanen les següents equacions segons el número de Reynolds¹⁶:

$$\text{Si } Re = \frac{v_m \cdot y}{\nu} < 2 \cdot 10^7$$

$$v_m = \frac{Q}{R_h \cdot P} = 10.76 \cdot (R_h^2 \cdot S)^{0.286} \quad [10]$$

Que permet obtenir una expressió per al pendent en funció del cabal que hi circula.

$$S = 0.0059 \cdot Q^{-0.278} \quad [11]$$

$$\text{Per altra banda, si } Re = \frac{v_m \cdot y}{\nu} > 2 \cdot 10^7$$

$$\frac{v_m}{v_*} = 0.535 \left(\frac{v_m \cdot b_m}{\nu} \right)^{0.185} \quad [12]$$

El significat de les noves variables és:

v_* velocitat de tall o de fricció que és igual a $\sqrt{g \cdot y \cdot S}$ (m/s)

ν viscositat cinemàtica que per l'aigua a 20°C té un valor de 10^{-6} (m²/s)

5.4.1 INTERVALS D'APLICABILITAT DE LES VARIABLES

Es mostren els límits dels paràmetres dins els quals es troben els canals estudiats per Simons i Albertson i que Maza i García (1996) recomanen no sobrepassar (Taula 7). Essent estrictes, tots els aforaments del reconeixement que no es localitzen dins els límits establerts s'han omès. L'operació es resumeix amb la xifra de 21 seccions vàlides de les 148 descrites per D. Pedro Antonio. El factor limitador més important ha estat el requeriment del calat mínim necessari.

Taula 7. Rang de valors dels paràmetres avaluats per Simons i Albertson. Font: Maza i García (1996).

Amplada mitjana	b_m	0.6 a 79.2 m
Calat	y	0.84 a 3.15 m
Pendent hidràulica	S	0.000058 a 0.0097
Diàmetre mitjà del material de la llera	d_m	0.028 a 80.0 mm
Cabal líquid	Q	0.14 a 244 m ³ /s
Concentració del material transportat	C	156 a 3590 mg/l (Índia) 2500 a 8000 mg/l (Estats Units)

¹⁶ Mesura (adimensional) del ràtio entre les forces d'inèrcia i les forces viscoses.

5.5 MÈTODE D'ALTUNIN

La presentació del mètode es fa d'acord amb l'exposició que en fan Maza i García (1996)¹⁷. El mètode que desenvolupa Altunin l'any 1962 s'engloba dins el segon dels grups en els que es divideix l'estudi de la teoria del règim (veure apartat 5.1) tot i la seva voluntat de caire pràctic més característic del primer. El *semiempirisme* del mètode s'erigeix a partir de tres equacions fonamentals:

1. Resistència dels marges.
2. Moviment continu de les partícules del fons.
3. Resistència al flux o de fricció.

Altunin inicia l'estudi a partir de dades i observacions de rius de la Unió Soviètica amb lleres de material gruixut. Com a resultat, distingeix tres zones principals al llarg del desenvolupament longitudinal del riu (zona muntanyenca, zona intermèdia i zona de planura) i classifica les seccions d'un riu en dos tipus (de marges molt resistents a l'erosió o poc resistents).

El desenvolupament per a obtenir les relacions de règim a partir del concepte de resistència dels marges es basa en una combinació d'expressions conegudes incorporades a una relació d'aspecte típica dins la teoria del règim¹⁸.

$$B^m = K \cdot \gamma_m \quad [13]$$

On:

- K ¹⁹ és el coeficient de forma i pren valors compresos entre 3 (marges resistents a l'erosió) i 20 (marges fàcilment erosionables). El valor mitjà recomanat és 10 (-)
- m exponent empíric. Es recomana l'expressió analítica [18] desenvolupada més endavant.

El concepte de la tensió tallant s'incorpora també a la formulació.

$$\tau_b = \gamma \cdot R_h \cdot S \approx \gamma \cdot \gamma_m \cdot S \quad [14]$$

τ_b tensió tallant al fons de la llera²⁰ (N/m²)

γ pes específic de l'aigua amb un valor en aquesta tesina igual i constant de 10 kN/m³

¹⁷ S'introduirà una petita modificació en el paràmetre de Shields crític (θ_c) justificada més endavant.

¹⁸ Glushkov va presentar una versió inicial d'aquesta fórmula l'any 1925 que posteriorment Altunin va modificar.

¹⁹ En la perspectiva subjectiva de l'autor al determinar K i la seva variabilitat, rau bona part de la dificultat d'adaptar el mètode a les dades disponibles.

²⁰ Diversos autors (Vide, 2002; Maza i García, 1996) proposen el límit $B/y > 40$ per a definir una secció ampla essent així més vàlida la simplificació $R_h \approx \gamma_m$ i $P \approx B$. Tot i que no tots els perfils transversals estudiats compleixen la desigualtat, en els càlculs és acceptada correcta i així ho és també la simplificació proposada. L'objectu és agilitzar el procediment sense perdre rigor.

A l'hora d'avaluar l'esforç tallant crític, Altunin utilitza l'expressió adimensionalitzada definida com a paràmetre de Shields (θ) i xifra la magnitud del paràmetre de Shields crític (θ_c) en 0.039 (utilitzat per Glushkov amb anterioritat). Ara bé, els avenços en l'estudi de la tensió tallant crítica en lleres de diferents materials i mides (Fischenich, 2001) recomanen unes magnituds per a rius de grava lleugerament diferents: des de 0.039 per a granulometries més fines fins a 0.050 per a diàmetres mitjans superiors a 30 mm.

$$\tau_c = \theta_c \cdot \gamma \cdot (s - 1) \cdot d_m, \text{ essent } \theta_c = [0.039, 0.050] \quad [15]$$

Donades les característiques de la vall de l'Ebre, el θ_c que s'adopta en el present treball és igual a 0.050. Aquest canvi comporta una lleugera modificació de l'expressió original amb la que s'obtenen els esforços tallants crítics (τ_c).

Combinant l'equació [13] amb l'equació de Manning s'arriba a la relació que proporciona l'amplada de la superfície lliure que correspon a la primera equació fonamental:

$$B = E \cdot \left(\frac{Q}{S^{0.5}} \right)^{\frac{3}{3+5 \cdot m}} \quad [16]$$

On es defineix:

$$E = \left(n \cdot K^{\frac{5}{3}} \right)^{\frac{3}{3+5 \cdot m}} \quad [17]$$

$$m = \left(\frac{\tau_c}{\tau_b} \right)^{0.1} = 0.74 \cdot \theta^{-0.1} \quad [18]$$

I el significat de les noves variables és²¹:

- s és la densitat relativa del material de la llera i el seu valor és proper a 2.65 (-)
- θ paràmetre de Shields. És una mesura del ràtio entre les forces de fricció (relacionat amb la turbulència) i les forces gravitacionals. La seva expressió és $\tau_b / [(\gamma_s - \gamma) \cdot d_m]$ (-)

Altunin recomana finalment una expressió simplificada per a problemes pràctics de disseny [19]. Amb aquesta nova relació s'elimina la dependència de l'exponent de Q amb el coeficient m (i per tant dels esforços tallants a la llera), propietat que s'aprofitarà més endavant per a l'obtenció dels exponents en les relacions de proporcionalitat entre les diferents variables (γ_m , B , S , v_m) i el cabal Q dels mètodes avaluats (Taula 13).

$$B = \frac{E \cdot Q^{0.5}}{S^{0.2}} \quad [19]$$

Tot i així, en els càlculs s'utilitzarà l'equació [16] per ésser més precisa (Maza i García, 1996).

²¹ El canvi en el θ_c implica que m variï molt lleugerament. En concret, el coeficient 0.74 es transforma en 0.72 al considerar un θ_c igual a 0.039 en lloc del 0.050 proposat.

Les fórmules per garantir el moviment del material del fons es basen en el concepte de velocitat mitjana del corrent quan circula un calat d'un metre v_ϕ . La seva definició varia en funció de d_m i l'expressió que correspon a una granulometria com l'adoptada per a l'Ebre és:

$$v_\phi = \frac{1}{1.341 - 12.5 \cdot d_m} \quad [20]$$

Aquest nou concepte s'introdueix en la segona equació fonamental com:

$$v_m = \alpha \cdot v_\phi \cdot y_m^\alpha \quad [21]$$

- α coeficient igual a 1 per a la zona muntanyenca o intermèdia i per a la zona de planura varia entre 1.1 i 1.15. que depèn de la zona (muntanya, intermèdia, planura) i del calat respectivament.
- α exponent que depèn del calat igual a: 0.2 si $y_m > 2.5$ m, 0.25 si 1.5 m $< y_m < 2.5$ i 0.3 si $y_m < 1.5$ m.

Finalment, Altunin proposa una nova fórmula de resistència al flux malgrat haver emprat la fórmula de Manning per a l'obtenció de la primera equació fonamental. Així doncs la tercera equació fonamental presentada com a fórmula de fricció en lleres de material gruixut (amb els exponents ja recomanats al cas particular d'estudi) és:

$$v_m = 1.1 \cdot y_m^{1/2} \cdot S^{1/3} \quad [22]$$

De les equacions [21] i [22] s'obté l'expressió que proporciona el calat del corrent:

$$y_m = \left(\frac{\alpha \cdot v_\phi}{1.1 \cdot S^{1/3}} \right)^{\frac{1}{0.5-\alpha}} \quad [23]$$

I aplicant el concepte de cabal unitari $q = v \cdot y_m$ i que $Q = q \cdot B$ s'arriba a l'expressió per a determinar el pendent teòric d'equilibri:

$$S = \left(\frac{E^{0.5-\alpha} \cdot (\alpha \cdot v_\phi)^{1.5}}{1.1^{1+\alpha} \cdot Q^{0.25-0.5\alpha}} \right) \quad [24]$$

Amb aquesta breu descripció es completa el paquet de fórmules per al càlcul de la geometria hidràulica aigües avall que correspon a les equacions [16], [23] i [24] (amplada, calat i pendent respectivament) i la relació $v_m = Q/(B \cdot y_m)$ per obtenir la velocitat mitjana. A l'hora de computar-ho s'ha tingut cura d'aplicar els valor corresponents dels coeficients que Altunin defineix segons les característiques de cada aforament.

Fent un cop d'ull a com intervenen les diferents variables en les equacions abans descrites, s'observa que es tracta d'un mètode iteratiu per culpa de m i d' E que inclouen n , y_m i S en la seva definició [25], variables que cal estimar prèviament.

$$E = f(n, K, m = f(y_m, S, d_m, \theta_c)) \quad [25]$$

El procediment a seguir és:

1. Suposicions inicials del y_m , S i del coeficient de Manning n .
2. Comparació dels valors obtinguts amb els introduïts i càlcul de l'error relatiu²² (\mathcal{E}_r).
3. Repetir els càlculs amb els nous valors obtinguts fins arribar a la convergència. El criteri adoptat és: $\mathcal{E}_r < 0.05\%$.

Com a valors inicials s'han considerat les dades reals dels aforaments amb els coeficients de Manning obtinguts de la calibració realitzada amb HEC-RAS v4.0.

5.5.1 INTERVALS D'APLICABILITAT DE LES VARIABLES

Amb motiu de la descripció d'únicament un marc general on aplicar el mètode d'Altunin (segons Maza i García (1996) i la bibliografia consultada) sense especificar l'interval de les diferents variables que apareixen en l'estudi (pendents, cabals, etc.) s'han considerat vàlids els 148 aforaments disponibles.

5.6 EQUACIONS DE LEE I JULIEN (2006) A PARTIR DE JULIEN I WARGADALAM (1995)

En el capítol cap a la formulació d'una teoria del règim universal basada en criteris teòrics, Julien i Wargadalam (1995) van fer un avenç significatiu. Les seves equacions derivades de la teoria i un cop simplifiquades, calibrades, verificades i validades per Lee i Julien (2006)²³ amb una base de dades de 835 rius i canals proporcionen uns resultats amb una precisió força acceptable.

Els fonaments teòrics sobre els quals es basa són quatre relacions per a canals al·luvials no cohesius: cabal, resistència al flux, mobilitat del material de la llera i corrents secundaris en corbes. A l'Annex A es realitza una descripció més detallada.

A les expressions de Lee i Julien, les variables independents són el cabal (Q), la mida del material de la llera (d_{50}) i el pendent (S), i les variables dependents són l'amplada (B), el calat mitjà (y_m), la velocitat mitjana (v_m) i el paràmetre de Shields (θ).

Una de les principals crítiques, resignada pels mateixos autors, és que la seva formulació és dimensionalment incorrecte. Aquest problema, derivat de les equacions de regressió calculades,

²² L'error relatiu que marca la convergència del mètode es defineix com $\mathcal{E}_r = 100 \cdot |x_{nou} - x_{anterior}| / |x_{nou}|$

²³ Julien i Wargadalam (1995) van derivar unes relacions semiteòriques per a la geometria hidràulica.

Julien (2002) va calibrar els coeficients emprant una gran base de dades de rius sorrencs i de grava.

Finalment, Lee i Julien (2006) milloren els coeficients de regressió i amplien la base de dades incorporant rius de grava i còdols.

pot trobar la solució en el mètode que Parker *et al.* (2007) desenvolupa amb l'adimensionalització dels paràmetres que intervenen tal i com es mostra més endavant. La manca d'homogeneïtat dimensional, en canvi, no es produeix en les equacions originals de Julien i Wargadalam (1995) derivades de quatre equacions fonamentals però que requereixen d'un procés iteratiu feixuc.

Resumint, les equacions finalment proposades per Lee i Julien (2006) són:

$$B_p = 3.004 \cdot Q_r^{0.426} \cdot d_{50r}^{-0.002} \cdot S_r^{-0.153} \quad [26]$$

$$y_{mp} = 0.201 \cdot Q_r^{0.336} \cdot d_{50r}^{-0.025} \cdot S_r^{-0.060} \quad [27]$$

$$v_{mp} = 2.996 \cdot Q_r^{0.198} \cdot d_{50r}^{0.007} \cdot S_r^{0.242} \quad [28]$$

$$\theta_p = 0.090 \cdot Q_r^{0.423} \cdot d_{50r}^{-0.965} \cdot S_r^{0.912} \quad [29]$$

On el subíndex p significa que són els valors predits i r els valors del reconeixement de D. Pedro Antonio.

A partir de les relacions [26] - [29] s'analitza la importància relativa de les variables considerades pels autors com a definitòries de la geometria hidràulica dels rius: Q , d_{50} i S . No obstant, Lee i Julien presenten una cinquena relació amb el pendent en funció de la resta de variables [30], obtinguda a partir de l'equació [29] que provoca que S apareixi alhora com a variable independent S_r i dependent S_p (està implícita a la definició de θ_r).

$$S_p = 4.981 \cdot Q_r^{-0.346} \cdot d_{50r}^{0.955} \cdot \theta_r^{0.966} \quad [30]$$

Aquest fet, que matemàticament es pot escriure com $S_p = f(Q_r, d_{50r}, \theta_r(S_r))$ on r indica que és el valor real (que en aquest treball és el calculat per D. Pedro Antonio), origina que la convergència de resultats predits i reals sigui molt bona. Un fenomen similar succeeix amb l'expressió θ_p [29] perquè l'autèntic θ incorpora també les variables S i d_{50} en la seva pròpia definició (0). Així doncs, la relació mantinguda entre $\theta_p = f(Q_r, d_{50r}, S_r)$ i $\theta_r = f(y_{mr}, d_{50r}, S_r)$ també haurà influït en el procés de calibració i validació a l'hora d'obtenir els coeficients i els exponents de l'equació. És per aquest motiu que en la següent anàlisi no es considerarà l'expressió de S_p [30] i l'expressió de θ_p [29] s'analitzarà amb especial cura.

5.6.1 ANÀLISI DELS EXPONENTS DE LES EQUACIONS DE LEE I JULIEN (2006)

Els exponents en el cabal són els majors per a calcular l'amplada i el calat mitjà de la secció; els exponents en el pendent són els majors per a calcular la velocitat mitjana i el paràmetre de Shields. La diferència entre els exponents en valor absolut denota quins són els paràmetres més influents i que més amplifiquen l'error en cas de produir-se errades en la mesura. A la Taula 8 queda palesa la diferència entre els diversos exponents, destacant en negreta el valor màxim

en cada relació i escrivint la resta en funció de la fracció del màxim que representen. Exceptuant la relació pel càlcul del paràmetre de Shields, la mida del material de la llera (representat pel d_{50}) és el paràmetre amb exponents més propers a zero i, per tant, que menys influeix en el resultat final²⁴. Aquesta dada és important ja que, tal i com s'ha explicat en apartats anteriors, la informació granulomètrica emprada en aquesta tesina ha hagut d'adaptar-se d'estudis actuals i, a més a més, sense tenir mostres representatives de totes les zones rellevants de la conca (capçaleres dels rius, trams mitjans, etc.).

Taula 8. Exponents en valor absolut a les relacions de Lee i Julien (2006). En negreta el valor màxim per a cada relació i la resta en funció de la fracció del màxim que representen. Font: elaboració pròpia.

	Q	d_{50}	S
B	0.426	$x 1/200$	$x 1/3$
y_m	0.336	$x 1/13$	$x 1/6$
v_m	$x 9/11$	$x 1/35$	0.242
θ	$x 1/2$	0.965	$x 1$

Numèricament, el valor de d_{50}^x (on x representa la magnitud de l'exponent segons la relació considerada) varia al considerar entre una mida de 10 mm a una de 200 mm²⁵ un 0.6% en el càlcul de l'amplada, un 7.3% en el del calat mitjà i un 2.1% en el de la velocitat mitjana. La petitesa dels percentatges està del cantó de la seguretat amb el benentès que és la informació granulomètrica introduïda la que pot estar subjecte a més error. L'afectació dels possibles errors de la granulometria en el càlcul de θ_p (on d_{50} està elevat a gairebé la unitat) es suavitza per ésser θ_r també depenent d'aquesta variable.

5.6.2 INTERVALS D'APLICABILITAT DE LES VARIABLES

Es mostren els rangs amb els quals s'ha basat el treball de Lee i Julien. S'ometen les dades del laboratori per mostrar únicament els rangs de paràmetres de camp.

Taula 9. Rang de les diferents variables dels rius i canals avaluats per Lee i Julien (2006) Font: ibíd.

Amplada	B	1.44 a 1097 m
Calat mitjà	y_m	0.04 a 16 m
Velocitat mitjana	v_m	0.02 a 7.1 m/s
Cabal líquid	Q	0.048 a 26560 m ³ /s
Pendent	S	0.00001 a 0.081 (m/m)
Mida del material de la llera	d_{50}	0.01 a 945 mm

²⁴ Curiosa és la relació extreta de les equacions [26] i [27] $B/y_m \propto d_{50}^{0.023}$ que tot i ésser un exponent molt petit és coherent amb la hipòtesi que B/y_m és més gran com major és el contingut de material groller en la llera (Martín Vide, 2002).

²⁵ Donat l'interval de d_{50} adoptat per a l'Ebre en aquest treball (entre 15 i 40 mm), no seria estrany trobar aforaments en les zones muntanyoses de la conca on les granulometries reals superessin amb escreix els 40 mm.

Paràmetre de Shields θ 0.00092 a 3.5 (-)

Només dos són els aforaments que resten fora de l'ampli interval de condicions que han servit per formular les equacions de Lee i Julien. L'aforament del Trisuerra presenta un pendent massa pronunciat i a Parralozas hi circula un cabal escàs. Tots dos aforaments, que es troben en la regió superior, s'han exclòs. Es remarca el fet que els nombrosos aforaments realitzats a les capçaleres dels rius es troben dins d'un context de fortes pendents i cabals minsos que dificulten la seva anàlisi.

5.7 L'APROPAMENT DE PARKER. L'ADIMENSIONALITZACIÓ

Abans de concloure l'apartat de la teoria del règim amb una avaluació conjunta dels resultats, és interessant l'aproximació que Parker *et al.* (2007) realitza en l'estudi de *fonaments físics per a relacions quasi universals que descriguin la geometria hidràulica aigües avall de rius de graves de llera única*²⁶.

S'ha comprovat com les equacions emprades en els mètodes anteriors no eren dimensionalment homogènies. Relacions de la forma [31] essent α i α constants, típiques en molts dels mètodes de la teoria del règim, no ajuden a revelar els fonaments físics subjacents i es necessita una aproximació diferent.

$$B = \alpha \cdot Q^\alpha \quad [31]$$

El que Parker *et al.* proposa (i que més autors han estudiat també) és la creació de variables adimensionals per a la geometria de rius de grava amb llera plena i desenvolupar a partir d'aquestes variables un marc que permeti l'estudi dels conceptes físics sobre els quals es fonamenten.

Similar a l'estudi de Julien i Wargadalam (1995) i el posterior de Lee i Julien (2006), les variables independents són el cabal dominant, la mida del material de la llera i la resta que Parker *et al.* omet per a facilitar l'anàlisi. L'amplada de la superfície lliure, el calat mitjà i el pendent són les variables dependents que s'adimensionalitzen i s'analitzen per tal d'obtenir les relacions quasi universals que, un cop calibrades, proporcionen la geometria hidràulica amb una precisió òptima i dimensionalment homogènies.

L'adimensionalització de l'amplada de la superfície lliure amb llera plena \tilde{B} i el calat mitjà \tilde{y}_m són:

²⁶ Es poden distingir dues morfologies fluvials típiques: llera trenada (multiplicitat de lleres més petites separades per illes que es bifurquen i reuneixen aigües avall) i llera meàndrica (la llera és única però forma corbes).

$$\tilde{B} = \frac{g^{1/5} \cdot B}{Q^{2/5}} \quad [32]$$

$$\tilde{y}_m = \frac{g^{1/5} \cdot y_m}{Q^{2/5}} \quad [33]$$

I l'expressió adimensionalitzada del cabal és:

$$\hat{Q} = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot d_{50}} \cdot d_{50}^2} \quad [34]$$

Es busquen relacions del tipus:

$$\tilde{B} = f(\hat{Q}) \rightarrow \tilde{B} = \alpha_B \hat{Q}^{n_B} \quad [35]$$

$$\tilde{y}_m = f(\hat{Q}) \rightarrow \tilde{y}_m = \alpha_{y_m} \hat{Q}^{n_{y_m}} \quad [36]$$

$$S = f(\hat{Q}) \rightarrow S = \alpha_S \hat{Q}^{n_S} \quad [37]$$

Que malgrat la seva semblança amb el tipus d'equacions emprades en anteriors mètodes (e.g. equació [13]), els coeficients $\alpha_B, \alpha_{y_m}, \alpha_S, n_B, n_{y_m}$ i n_S que apareixen en aquestes relacions potencials són adimensionals.

Les equacions a les que Parker *et al.* arriba s'obtenen un cop feta la regressió lineal d'ajust potencial dels resultats, a partir d'una gràfica de \tilde{B} , \tilde{y}_m i S en funció de \hat{Q} . Al resubstituir les variables per a obtenir les formes dimensionalitzades, les equacions presenten el següent aspecte²⁷:

$$B = \frac{4.63}{g^{0.2}} \cdot Q^{0.4} \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt{g \cdot d_{50}} \cdot d_{50}^2} \right)^{0.067} \rightarrow B = 2.718 \cdot Q^{0.467} \cdot d_{50}^{-0.167} \quad [38]$$

$$y_m = \frac{0.382}{g^{1/5}} \cdot Q^{0.4} \rightarrow y_m = 0.242 \cdot Q^{0.4} \quad [39]$$

$$S = 0.101 \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt{g \cdot d_{50}} \cdot d_{50}^2} \right)^{-0.344} \rightarrow S = 0.150 \cdot Q^{-0.344} \cdot d_{50}^{0.860} \quad [40]$$

On els coeficients de les equacions [35] – [37] es poden identificar com $\alpha_B = 4.63$, $\alpha_{y_m} = 0.382$, $\alpha_S = 0.101$, $n_B = 0.0667$, $n_{y_m} = 0$, $n_S = -0.344$.

²⁷ Les expressions de l'esquerra respecten la forma de la presentació de Parker *et al.*, sense substituir la gravetat g pel seu valor de 9.81 m/s^2 .

L'enfocament teòric d'aquesta metodologia permetrà realitzar els mateixos passos per a obtenir unes equacions pròpies per als aforaments de la vall de l'Ebre en estiatge, amb els coeficients i exponents que millor s'adaptin.

5.7.1 INTERVALS D'APLICABILITAT DE LES VARIABLES

Els perfils transversals considerats per Parker *et al.* es troben compresos entre els valors resumits en la Taula 10. En destaca el d_{50} que representa granulometries exclusivament força grolleres.

Taula 10. Interval de les variables de la base de dades utilitzada per Parker et al. (rius de grava de la Gran Bretanya, el Canadà i els Estats Units d'Amèrica). Font: Parker et al. (2007).

Amplada	B	5.24 a 280 m
Calat mitjà	y_m	0.25 a 6.95 m
Cabal líquid	Q	2.7 a 5440 m ³ /s
Pendent	S	0.00034 a 0.031 (m/m)
Mida del material de la llera	d_{50}	27 a 167.5 mm

Tal i com s'ha emfatitzat és important cenyir-se al rang d'aplicabilitat de cada mètode. No obstant, no s'ha tingut en compte la restricció que imposaria l'interval de la d_{50} que per a la vall de l'Ebre accepta valors de 15, 25 o 40 mm (veure 4.6.1) però sense ésser obtinguts a partir d'un estudi granulomètric exhaustiu. En resum, emprar la base de dades de l'Ebre retalla a 62 els aforaments vàlids, essent els pertanyents a la regió superior i capçaleres dels rius els que majoritàriament resten fora de l'estudi.

5.7.2 PARKER MODIFICAT

Resulta interessant poder formular les relacions potencials que millor s'adaptin a les dades del reconeixement a partir del raonament de Parker *et al.* Aquestes noves relacions s'anomenaran *Parker modificat*.

Primer es dibuixa la gràfica amb les variacions de \tilde{B} , \tilde{y}_m i S respecte de \hat{Q} (les variables adimensionals definides anteriorment). Com que les dades de la vall de l'Ebre comprenen uns intervals molt amplis, a l'hora de calcular les regressions lineals no s'han considerat els aforaments amb valors extrems a les variables S, y_m , v_m , S i Q (representats amb una creu a la Figura 12). Per exemple, sobre la resta de punts destaquen especialment dos: el Trisuerra (núm. 1), amb un pendent molt pronunciat del 9%, i el Parralozas (núm. 6), on el cabal que circula és molt escàs (0.023 m³/s).

Malgrat tot, són 139 els aforaments introduïts i s'inclouen, per tant, la majoria dels que restaven fora segons els rangs establerts per Parker *et al.* Així doncs, s'accepta que pugui donar-se cabuda a trams de morfologies ben diferents (degut a la gran varietat de valors tal i com es

mostra a la Taula 6) amb l'objectiu d'obtenir una perspectiva global de quina és l'evolució dels paràmetres en els aforaments.

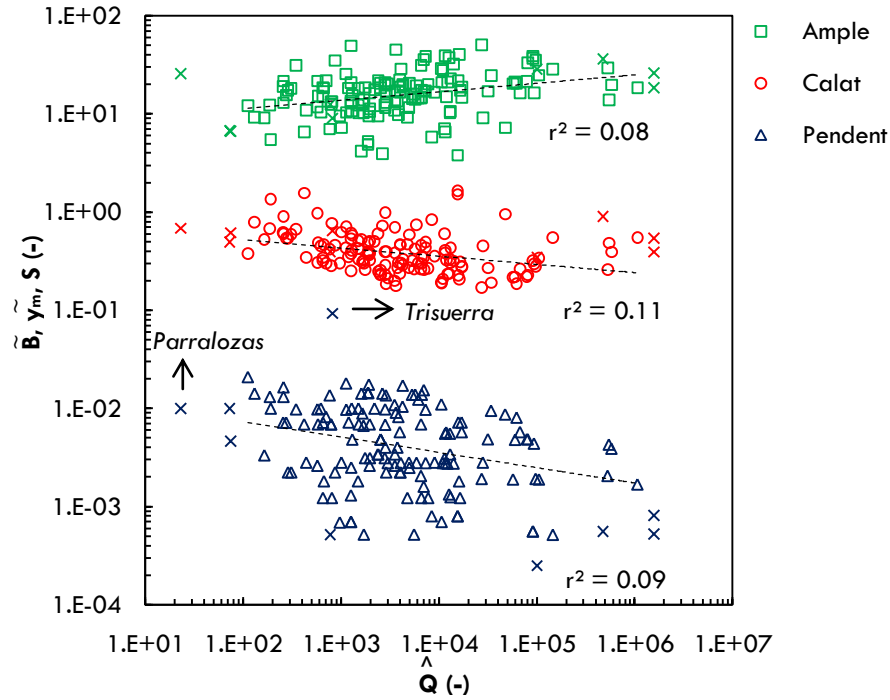


Figura 12. Amplada adimensional, calat adimensional i pendent com a funcions del cabal adimensional. Eixos logarítmics. Les equacions de les regressions lineals d'ajust potencial corresponen a les equacions [41] – [43] i es mostren en la gràfica juntament amb els coeficients de determinació. Font: elaboració pròpia.

Les relacions potencials obtingudes de les regressions lineals, que proporcionen els coeficients i exponents de les equacions [35] – [37], són:

$$\tilde{B} = 7.647 \cdot \hat{Q}^{0.086} \quad [41]$$

$$\tilde{y}_m = 0.771 \cdot \hat{Q}^{-0.084} \quad [42]$$

$$S = 0.015 \cdot \hat{Q}^{-0.156} \quad [43]$$

I finalment les relacions dimensionalitzades, substituint el valor de la gravetat per $g = 9.81 \text{ m/s}^2$:

$$B = \frac{7.647}{g^{0.2}} \cdot Q^{0.4} \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt{g \cdot d_{50}} \cdot d_{50}^2} \right)^{0.086} \rightarrow B = 4.391 \cdot Q^{0.486} \cdot d_{50}^{-0.215} \quad [44]$$

$$y_m = \frac{0.771}{g^{1/5}} \cdot Q^{0.4} \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt{g \cdot d_{50}} \cdot d_{50}^2} \right)^{-0.084} \rightarrow y_m = 0.537 \cdot Q^{0.316} \cdot d_{50}^{0.210} \quad [45]$$

$$S = 0.015 \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt{g \cdot d_{50}} \cdot d_{50}^2} \right)^{-0.156} \rightarrow S = 0.018 \cdot Q^{-0.156} \cdot d_{50}^{0.390} \quad [46]$$

S'empraran aquestes tres equacions en la predicció de la geometria fluvial tot i que pròpiament no conformen un mètode propi.

5.8 LA COMPARACIÓ ENTRE ELS MÈTODES

Un cop exposats tots els mètodes i previ a la presentació dels resultats, es fa una revisió global dels trets distintius que presenten les seves formulacions.

5.8.1 FONAMENTS TEÒRICS

D'acord amb la divisió en dues perspectives a l'aproximació a la teoria del règim, es resumeixen quins són els punts de partida de cada autor.

Taula 11. Fonaments teòrics en els diferents mètodes. Font: elaboració pròpia

Simons i Albertson	<i>Empíric</i>	Dades de canals a l'Índia i als Estats Units.
Altunin	<i>Semiempíric</i>	Observacions en rius de la Unió Soviètica. Teoria subjacent: Resistència dels marges Moviment continu de les partícules del fons Resistència al flux
Lee i Julien	<i>Empíric a partir d'anàlisi semiteòric</i>	Gran base de dades. Formulació a partir del calibratge d'equacions de regressió. Teoria subjacent a Julien i Wargadalam (1995): Cabal Resistència al flux (Einstein i Chien, 1954) Corrents secundaris (Rozovskii, 1961) Mobilitat de les partícules (Shields, 1936)
Parker et al.	<i>Semiempíric</i>	Àmplia base de dades (Estats Units, Canadà i Anglaterra). Relacions dimensionalment homogènies. Teoria subjacent: Resistència al flux (Manning-Strickler) Transport de graves (Parker, 1979, i Einstein, 1950) Paràmetre de Shields en condicions de llera plena (Parker, 1978) Relació per a la disponibilitat de graves

5.8.2 VARIABLES

Els diferents mètodes mostren les equacions constitutives a partir de la introducció o definició de paràmetres singulars. Des de l'empirisme de Simons i Albertson fins a les equacions de regressió amb coeficients adimensionals de Parker *et al.*, les variables que cada autor empra responen als fonaments als quals han basat la seva recerca.

La Taula 12 reflecteix la varietat de variables utilitzades i resumeix la idea de fons sobre la que es basa cada mètode. Amb Simons i Albertson s'obté la geometria hidràulica de disseny o estable a partir de dades del cabal exclusivament (ressaltant el caràcter empíric i pràctic), és a dir, no es fa referència ni a la granulometria de la llera ni al transport de sediments.

Per la seva banda Altunin i Lee i Julien (a partir de treball de Julien i Wargadalam) sí incorporen la mida del material de la llera i el paràmetre de Shields, l'últim com a indicador del transport sòlid. Alhora, Altunin defineix uns altres paràmetres propis que depenen de característiques particulars del riu, mentre que Lee i Julien incorporen també el pendent com a variable independent i determinant per a predir la geometria hidràulica aigües avall. Amb tot, la metodologia i el raonament de Lee i Julien resulta més pràctic (tot i la clara voluntat d'Altunin pel disseny de canals) i es basa en un rang major de condicions.

Finalment, Parker *et al.*, a més de la simplicitat de la seva formulació a partir de dades del cabal dominant i de granulometria de la llera (calibrada i validada amb una extensa base de dades), presenta unes equacions dimensionalment homogènies a partir de les quals cerca el significat físic als resultats.

Taula 12. Resum de les variables emprades pels autors dels mètodes mostrats. Font: elaboració pròpia.

	Variables independents	Variables dependents
Simons i Albertson	Q	B, P, R_h, v, S
Altunin	$Q, d_m, (K, \alpha, \alpha')$	$n^*, S^*, \gamma_m^*, v_m, \tau_b, \tau_c, (m, v_\phi)$
Lee i Julien	$Q, d_{50}, S^{**}, \theta^{**}$	$B, v_m, \gamma_m, \theta^{**}, S^{**}$
Parker	Q, d_{50}	B, γ_m, S

Entre parèntesis apareixen les variables definides específicament per l'autor del mètode.

* Al tractar-se d'un mètode iteratiu, cal introduir al començament un calat, un paràmetre de Manning i un pendent que s'han de comprovar al final fins convergir.

** La formulació de Lee i Julien permet obtenir el pendent a partir de les dades del paràmetre de Shields o a la inversa.

Lee i Julien presenten la formulació més complerta gràcies en gran part al treball emprat com a base teòrica de Julien i Wargadalam. L'inconvenient de presentar equacions dimensionalment incorrectes (tot i que les originals de Julien i Wargadalam eren dimensionalment homogènies) es justifica per la practicitat en la manera de presentar-les. A més a més, la base de dades és força més extensa que la disposada per Parker *et al.* i comprèn un rang més ampli d'aplicabilitat, sobretot pel que fa a aforaments amb magnituds més petites. Per últim, en el càlcul de l'amplada la mida del material de la llera apareix a la formulació de Lee i Julien elevada a una potència molt inferior que a Parker *et al.* reduint la propagació d'errors per incorreccions en la granulometria.

Es conclou expressant que les relacions d'Altunin (1962) i de Lee i Julien (2006) gaudeixen d'una configuració inicial més idònia per a proporcionar uns resultats més acurats que la resta dels mètodes proposats, tot i que Altunin inclou una sèrie de variables a priori desconegudes i que

depenen de les característiques de la llera (de les quals en destaca K) el valor de les quals és força imprecís.

5.8.3 EXPONENTS DEL CABAL

Observant les equacions de diferents teories del règim s'observa un tret en comú: és indiscutible l'ús del cabal (líquid dominant) com a variable independent i fonamental per a determinar la geometria hidràulica aigües avall.

És important, per tant, conèixer el grau d'influència que la magnitud d'aquest cabal exerceix en els resultats per a obtenir les diverses variables de la geometria hidràulica. Com a punt de partida, es mostren les gràfiques de la variació de les dades originals de la vall de l'Ebre B , y_m , v_m i S amb el Q , de les quals s'han obtingut els exponents i els coeficients de les expressions tipus $f = a \cdot Q^b$ dimensionalment incorrectes, on f és cadascuna de les variables considerades (Figura 13).

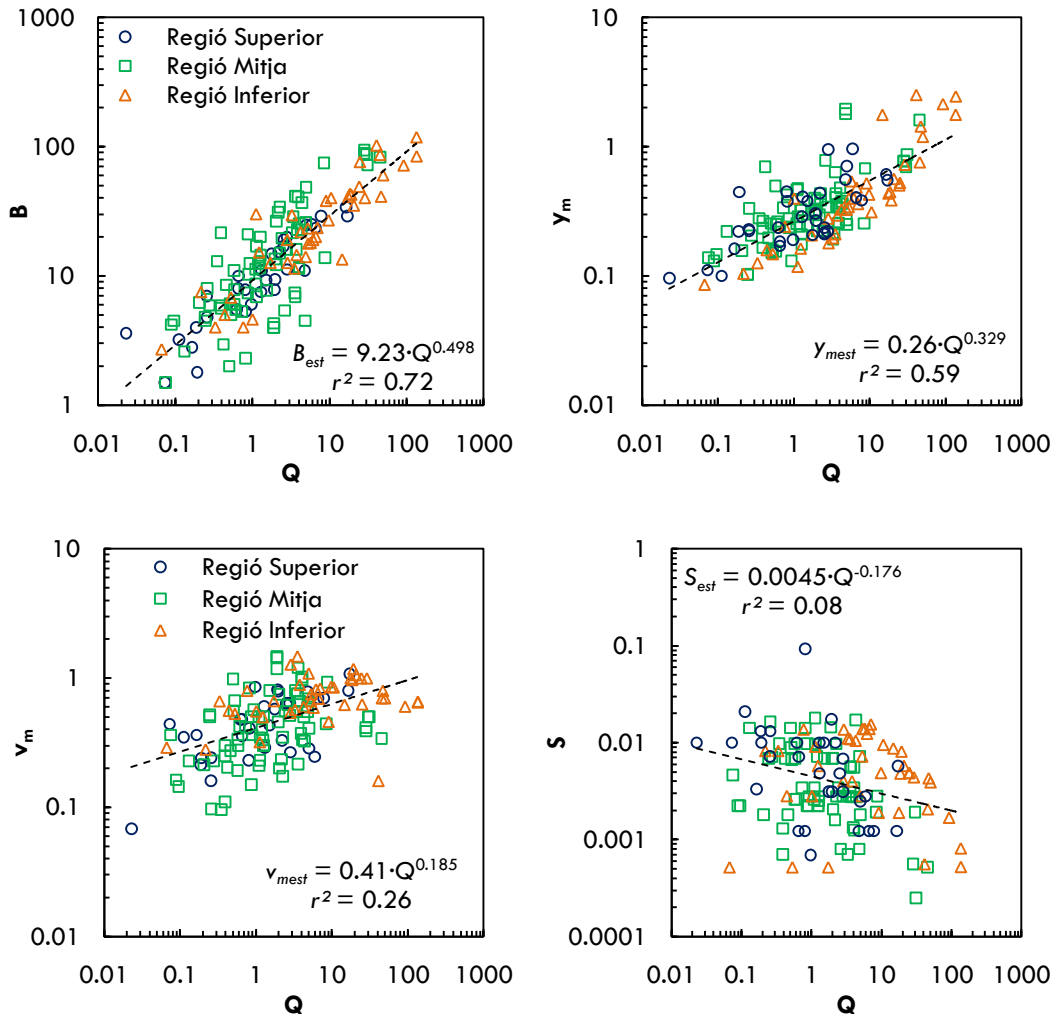


Figura 13. Variació de B , y_m , v_m i S amb Q dels 148 aforaments de la vall de l'Ebre. Les dades s'han classificat segons la regió a la que pertanyen. Es comprova que no hi ha un ordre i que les dades apareixen barrejades i amb força dispersió. Els eixos són logarítmics. Les rectes de regressió

es mostren en les gràfiques i el subíndex e significa estimació. Els coeficients de determinació de v_m - Q i S - Q són molt baixos.

L'elecció d'una regressió lineal d'ajust potencial és pel fet que encaixa millor amb els resultats. Tot i així, la correspondència potencial entre les variables y_m , v_m , S i Q és força dèbil. Entre B i Q i en menor grau entre y_m i Q ($r^2 = 0.72$ i $r^2 = 0.59$, respectivament) es pot entreveure una convergència dels resultats al voltant de les regressions lineals que donen validesa a les expressions potencials obtingudes. Entre S i Q la relació és pràcticament nul·la ($r^2 = 0.08$). Per la manca d'un ordre en els punts representats, e.g. agrupacions dels punts que corresponen a una mateixa regió, el resultat del següent apartat es mostraran sense distinció de la regió a la que pertanyen.

En aquest context, es resumeixen (Taula 13) els exponents que apareixen en la variable del cabal a les equacions emprades en anteriors apartats per a definir la geometria fluvial: Simons i Albertson (1963), Altunin (1962), Lee i Julien (2006), Parker *et al.* (2007) i Parker modificat, i s'incorporen els que s'obtenen de les regressions lineals amb ajust a una llei potencial obtinguts directament de les dades de la vall de l'Ebre (Figura 13).

Taula 13. Exponents del cabal en les expressions dels diferents mètodes estudiats i en les relacions potencials de les dades de la vall de l'Ebre. Els exponents emprats per Lacey es mostren per ésser una de les primeres teories del règim completa per al disseny de canals estables. Els valors corresponents a Altunin s'han obtingut acceptant la simplificació que proposa amb l'expressió [19], aprofitant que el cabal Q no depèn dels esforços tallants a la llera (τ_b i τ_c) (apartat 0). Font: elaboració pròpia.

	$B \propto Q^x$	$y_m \propto Q^x$	$v_m \propto Q^x$	$S \propto Q^x$
Lacey (1958)	0.500	0.333	0.167	-0.167
Simons i Albertson (1963)	0.512	0.361	0.127	-0.278
$y_m > 2.5 \text{ m}$	0.565	0.363	0.073	-0.325
Altunin (1962)				
$2.5 \text{ m} > y_m > 1.5 \text{ m}$	0.554	0.367	0.094	-0.268
$y_m < 1.5 \text{ m}$	0.535	0.349	0.117	-0.174
Lee i Julien (2006)	0.426	0.336	0.198	-0.346
Parker et al. (2007)	0.467	0.400		-0.344
Parker modificat	0.486	0.316		-0.156
Dades Ebre (Figura 13)	0.498	0.329	0.185	-0.176

Basant l'explicació en els exponents de Lacey (1930-1958) obtinguts a partir d'observacions de rius sorrencs no cohesius, les magnituds no han variat tant com hom podria imaginar.

La proporcionalitat de l'amplada amb l'arrel quadrada del cabal és força acceptable observant els diferents mètodes. Lee i Julien el rebaixa en un 15% i Altunin, en calats mitjans superiors als dos metres i mig, l'augmenta en un 13%. La resta de mètodes hi apliquen al voltant del $\pm 7\%$ de diferència. Considerant els més que significants esforços per expandir els diferents mètodes i englobar uns rangs d'aplicabilitat universals (llores cohesives, sorrenques, amb còdols, etc.), aquest interval de variació reduït és un clar indicador de la *quasi universalitat* d'aquesta proporcionalitat, que no només sembla complir-se en condicions de llera plena sinó també amb

aigües baixes, tal i com demostren els exponents de 0.498 obtingut amb les dades de l'Ebre o 0.486 obtingut amb Parker modificat.

El raonament a la proporcionalitat del calat amb l'arrel cúbica del cabal és similar al que es contempla per a l'amplada, tot i el petit augment generalitzat que introdueixen tots els autors, ressaltant el 20% d'augment en el cas de Parker *et al.*

Contràriament, trobar una relació de proporcionalitat amb el pendent és força complicat ja que les diferències entre els exponents són considerablement elevades perquè hi ha una gran dispersió dels resultats (tal i com s'observa a la Figura 13 i quedarà palès més endavant). Si Lacey quantifica l'exponent en $-1/6$, Simons i Albertson, Lee i Julien i Parker *et al.* en doblen la seva magnitud (100% de diferència). Els exponents a partir de Parker modificat i de les dades de l'Ebre són més propers, essent l'últim únicament un 5% inferior.

La proporcionalitat de la velocitat amb l'arrel sisena del cabal també varia segons l'autor. Mentre Altunin i Simons i Albertson presenten magnituds inferiors (fins a un 50%), Lee i Julien i el valor a partir de la regressió lineal de les dades de l'Ebre són lleugerament superiors (19% i 11% superiors respectivament).

Cal tenir present en tota aquesta anàlisi que tots els exponents exceptuant, els presentats per Parker *et al.* han de tenir unitats per tal que les expressions a les que pertanyen siguin dimensionalment homogènies.

En resum, les proporcionalitats entre cabal-amplada i cabal-calat són força uniformes sigui quin sigui el mètode emprat ($B \propto Q^{1/2}$ i $y_m \propto Q^{1/3}$ respectivament); el pendent i la velocitat mitjana, en canvi, mostren una major diversitat per a poder establir un exponent de proporcionalitat general.

Ressalta també que els exponents de Parker modificat i els obtinguts a les regressions lineals d'ajust potencial de les dades de l'Ebre en estiatge són molt semblants als originals presentats per Lacey, malgrat les grans diferències entre les característiques de la base d'estudi de Lacey (fonamentalment canals de sorra) i les dades de la vall de l'Ebre (rius de grava en estiatge). No obstant, la gran dispersió i la falta de correlació en les gràfiques de v_m i S amb Q li treuen vàlua a aquest fet.

5.9 RESULTATS

5.9.1 ESTRUCTURACIÓ I MÈTODE D'AVALUACIÓ I DE PRESENTACIÓ DELS RESULTATS

L'apartat s'estructura presentant primer els resultats i una breu anàlisi per a cada mètode per separat. Posteriorment es fa la discussió conjunta.

Les gràfiques mostrades comparen les variables predites (eix d'abscisses) amb les reals mesurades per D. Pedro Antonio (eix de coordenades)²⁸.

L'eficiència i la precisió dels mètodes s'avalua mitjançant els següents indicadors estadístics²⁹:

- I. Es calcula la regressió lineal i s'analitzen el pendent (β) i el punt d'intersecció amb l'eix de coordenades (y_{int}). L'equació de la recta és

$$est(re) = \beta \cdot pr + y_{int} \quad [47]$$

on $est(re)$ és l'estimació feta per la recta de regressió del valor real que l'estimació de la predicció vol igualar i re és la predicció del mètode avaluat.

- II. Desviació quadràtica mitjana relativa (DQMR) com a mesura dels errors d'estimació, independentment de les unitats en les que s'expressen les dades. Es recorda que la mitjana matemàtica emprada és la geomètrica.
- III. Coeficient de determinació (r^2) com una mesura de la proporció de la variància dels valors observats que és explicada pels valors predits.
- IV. Coeficient de desigualtat de Theil (U) com a mesura de la bondat d'ajust. Es calcula també la descomposició d' U en tres parts: biaix o terme associat amb la desviació mitja entre valors reals i observats (U_b), variància o terme associat amb el pendent de la regressió i la línia identitat ($U_{\beta=1}$) i covariància o terme associat amb la variància no explicada (U_e). S'ha de complir $U_b + U_{\beta=1} + U_e = 1$. Idealment, U_b ha d'ésser el menor i U_e el més gran.

5.9.2 MÈTODE DE SIMONS I ALBERTSON

Es mostren els resultats (Figura 14) que comparen l'amplada B , el calat y , la velocitat mitjana v_m i el pendent S reals amb els corresponents valors predits per Simons i Albertson (1963) dels 21 aforaments que resten dins dels intervals d'aplicabilitat pel mètode. Per a la comprensió de les gràfiques s'adjunta la taula amb els indicadors estadístics establerts (Taula 14).

²⁸ Configuració de les gràfiques: els eixos (coordenades i abscisses) es presenten en escala logarítmica. Una concordància perfecta dels resultats generaria punts (x,y) situats al llarg de la línia identitat (diagonal contínua en negre). Allunyats del cas ideal, es produeix una dispersió representada pel núvol de punts. Per a facilitar la lectura de les gràfiques s'afegeixen quatre rectes més:

- Diagonals externes de guions curts en negre: valors reals 5 vegades més grans (línia superior) o més petits (línia inferior) que els predits.
- Diagonals internes de guions llargs en negre: valors reals 2 vegades més grans (línia superior) o més petits (línia inferior) que els predits.

²⁹ Per a un raonament exhaustiu del perquè de la metodologia seguida per avaluar els mètodes es recomana la lectura de Piñeiro *et al.* (2008).

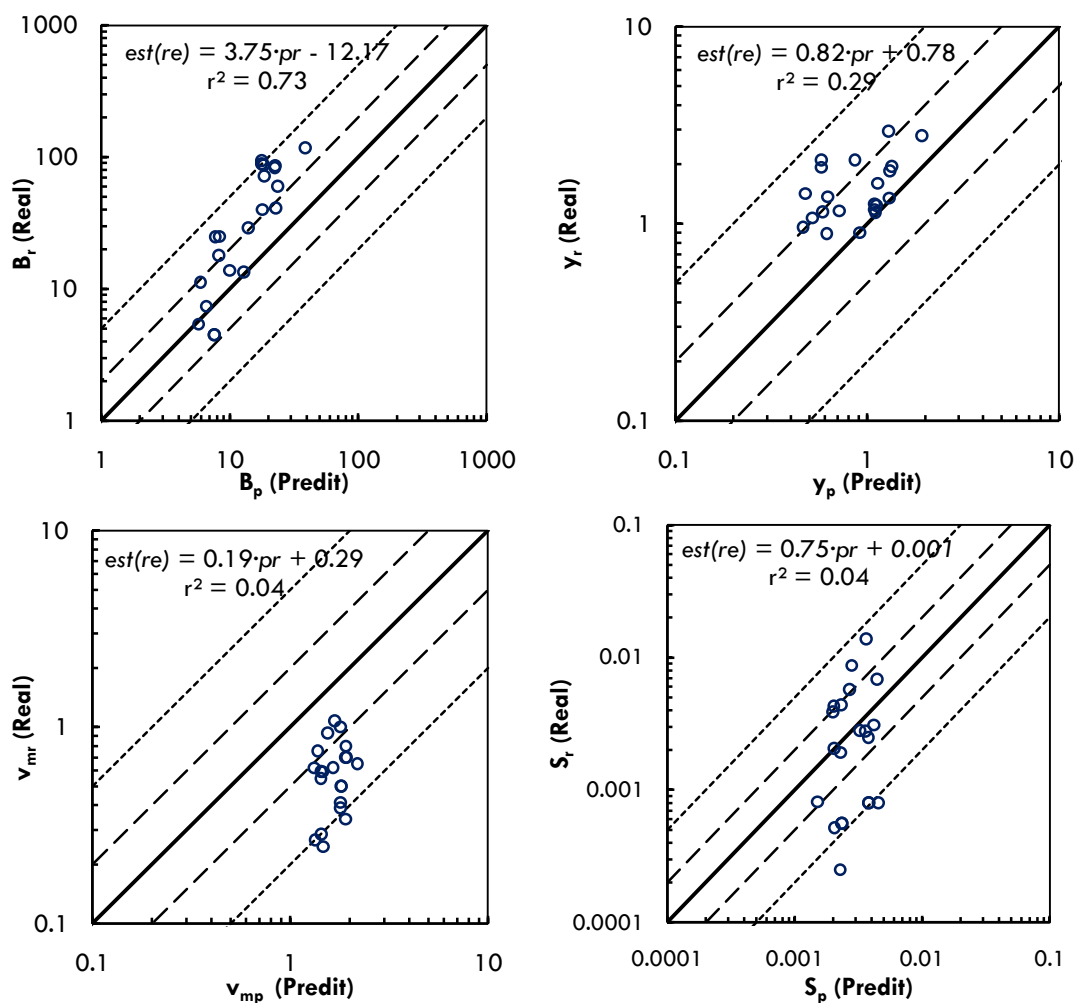


Figura 14. Comparació entre els valors de B , y , v_m i S predits pel mètode de Simons i Albertson (1963) i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 21 aforaments. Font: elaboració pròpia.

Taula 14. Paràmetres de la regressió i indicadors estadístics emprats en l'anàlisi dels resultats utilitzant el mètode de Simons i Albertson (1963). Font: elaboració pròpia.

		B	y_m	v_m	S
Simons i Albertson	<i>y</i> -intersecció	-12.17	0.78	0.29	0.0010
	β	3.75	0.82	0.19	0.75
	r^2	0.73	0.29	0.04	0.04
	DQMR (%)	147	54	201	163
	U	0.56	0.29	0.48	0.42
	U_b	0.50	0.61	0.93	0.01
	$U_{\beta=1}$	0.30	0.01	0.03	0.00
	U_e	0.20	0.38	0.04	0.99

5.9.3 DISCUSSIÓ

El mètode de Simons i Albertson divergeix dels valors reals de manera significativa en totes les variables avaluades amb les DQMR força elevats, especialment per a B , v_m i S . A més, el terme

U_b , associat errors sistemàtics, és el major per a B , y_m i v_m , essent el terme U_e , associat a la variància no explicada, el major per a S . La correspondència entre els valors predits i els reals és molt petita a excepció de l'amplada ($r^2 = 0.73$).

Fent un resum de les tendències observades en els resultats (és a dir, de com evolucionen els valors predits amb els valors reals), la regressió lineal de B - B_p presenta un pendent elevat de $\beta=3.75$ i indica que les diferències entre els valors predits i reals augmentaran a mesura que les magnituds es facin més grans. Globalment la predicció es correspon amb una secció més estreta que la real, tot i que la y -intersecció és negativa (-12 m). Anàlogament, y és en general més poc profund que el real ($\beta=0.82$, $y_{int}=0.78$). Conjuntament amb l'anterior observació de l'amplada en resulta que les seccions estables predites són més estretes i poc profundes que les dels aforaments practicats a la conca de l'Ebre en estiatge.

Gràficament es compara l'aforament de l'Ebre a San Martín de Helines (núm. 18, amb dimensions similars a la mitjana dels 21 aforaments admesos en el mètode de Simons i Albertson) amb la secció estable a partir de l'esquema de la Figura 10 que s'obté prenent valors mitjans a B_p i y_p (Figura 15).

Taula 15. Mitjanes de les variables de geometria hidràulica dels 21 aforaments dins dels intervals d'aplicabilitat de Simons i Albertson (esquerra) i les corresponents de les prediccions (dreta). Font: elaboració pròpia.

	Mitjana valors reals (21 aforaments)	Mitjana valors predits (Simons i Albertson, 1963)
B (m)	27.95	13.01
b_m (m)	18.42	11.26
y (m)	1.45	0.86
v_m (m/s)	0.55	1.65
S (-)	0.00196	0.00279

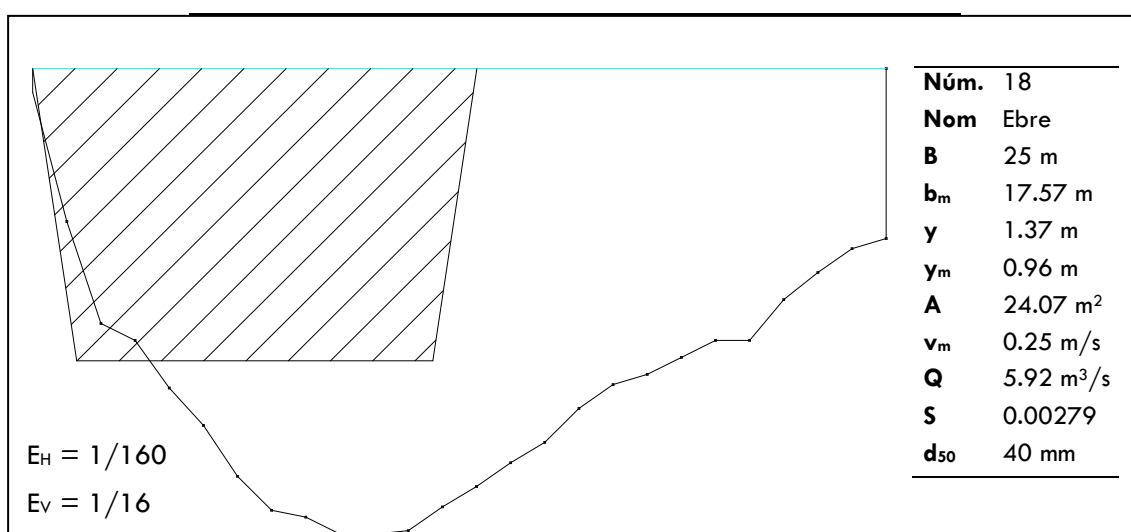


Figura 15. Comparació de la secció estable a partir dels resultats de Simons i Albertson (ratllada) amb la secció de l'aforament a l'Ebre (número 18) a San Martín de Helines. La secció estable s'obté

a partir de la Figura 10 i el talús és 2v:3h per ser àmpliament utilitzat i recomanat a la pràctica. L'escala vertical està exagerada en un factor 10. Font: elaboració pròpia.

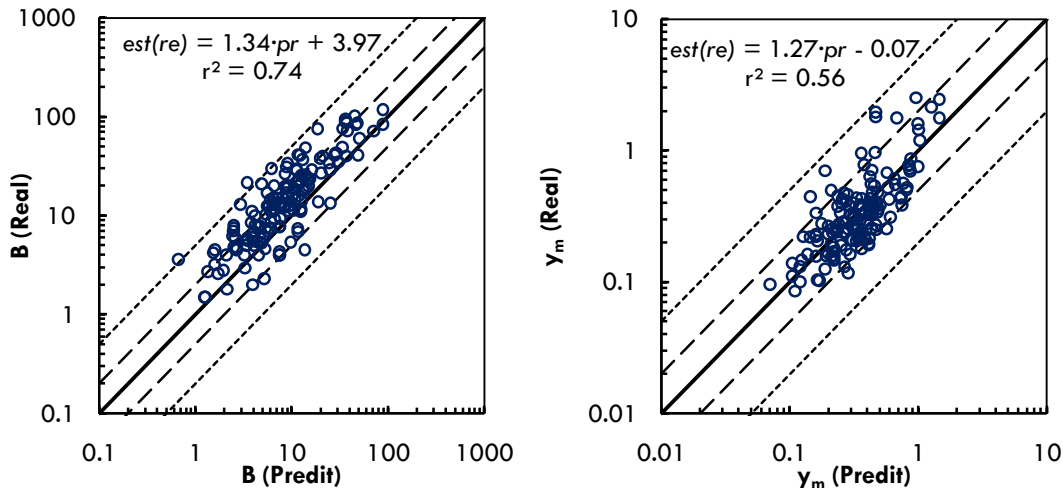
Com a conseqüència de les reduïdes dimensions predites és natural, doncs, que les v_{mp} siguin a la vegada superiors que les reals per tal de complir el principi de continuïtat. A l'introduir els valors mitjans (Taula 15) els cabals que s'obtenen són força similars.

$$Q_p = b_{mp} \cdot \gamma_p \cdot v_{mp} = 15.98 \text{ m}^3/\text{s} \approx Q_r = b_{mr} \cdot \gamma_r \cdot v_{mr} = 14.69 \text{ m}^3/\text{s} \quad [48]$$

Els pendents predits semblen adoptar un valor mitjà al voltant de 0.003 però és on més dispersió s'aprecia. Parker *et al.* (2007) resalta el fet que mentre els rius en llera mòbile varien lliurement l'amplada i el calat en un temps d'escala geològica reduït, els canvis en el pendent requereixen una completa reestructuració del perfil del riu. Aquest fenomen pot comportar escales de temps molt superiors i pot ajudar a explicar la dificultat de predir amb exactitud el pendent d'un riu en règim.

5.9.4 MÈTODE D'ALTUNIN (1962)

Es mostren els resultats (Figura 16) que comparen l'amplada B , el calat mitjà y_m , la velocitat mitjana v_m i el pendent S reals amb els corresponents valors predits per Altunin (1962) dels 148 aforaments que resten dins dels intervals d'aplicabilitat del mètode. S'han computat 4 iteracions per arribar a la convergència. Per a la comprensió de les gràfiques s'adjunta la taula amb els indicadors estadístics establerts (Taula 16).



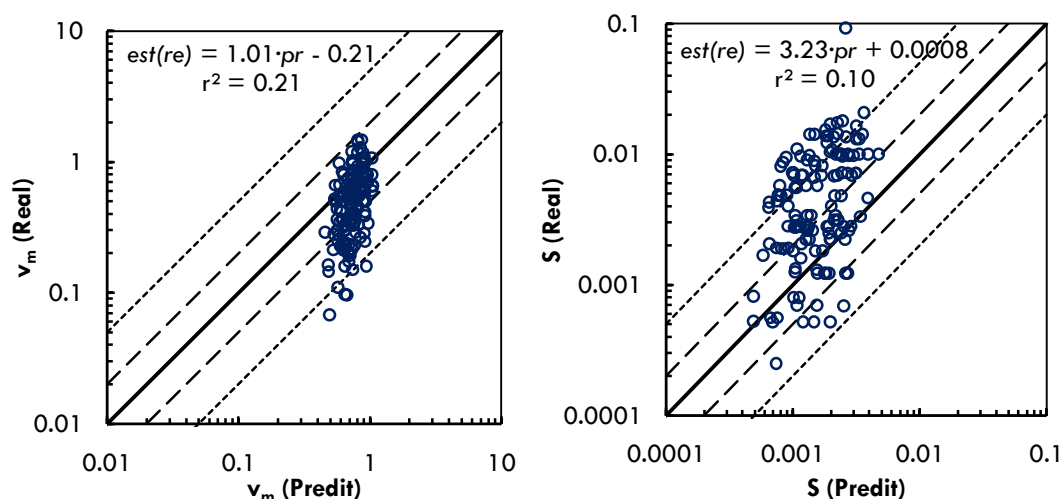


Figura 16. Comparació entre els valors de B , y_m , v_m i S predits pel mètode d'Altunin (1962) i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 148 aforaments. Font: elaboració pròpia.

Taula 16. Paràmetres de la regressió i indicadors estadístics emprats en l'anàlisi dels resultats utilitzant el mètode d'Altunin (1962). Font: elaboració pròpia.

	B	y_m	v_m	S
<i>y</i> -intersecció	3.97	-0.07	-0.21	0.0008
β	1.34	1.27	1.01	3.23
r^2	0.74	0.56	0.21	0.10
Altunin				
DQMR (%)	114	90	70	229
U	0.30	0.27	0.24	0.76
U_b	0.30	0.02	0.36	0.24
$U_{\beta=1}$	0.11	0.05	0.00	0.04
U_e	0.59	0.93	0.64	0.73

5.9.5 DISCUSSIÓ

En els resultats que finalment es mostren s'ha emprat un coeficient de forma $K = 20$ després d'haver comparat la utilització de diverses magnituds. Aquesta xifra, que pot situar-se en el límit superior dels diferents valors que K podria d'adoptar, indica que suposadament les lleres a la vall de l'Ebre tenen una mobilitat accentuada. Caldria fer més estudis sobre quin és l'efecte del coeficient K en el mètode d'Altunin (1962).

L'aspecte de les gràfiques millora respecte al mètode de Simons i Albertson. Tot i així, les DQMR segueixen essent força elevats. El terme U_e és el major en les quatre variables, factor que pot considerar-se positiu. De la mateixa manera els coeficients de la desigualtat Theil U són inferiors, amb excepció del corresponent a S . La correspondència entre els valors predits i reals segueix essent petita i l'amplada mostra el major valor ($r^2 = 0.74$).

Fent un resum de les tendències observades en els resultats, les regressions lineals presenten uns paràmetres força acceptables, amb β propers a la unitat i y -intersecció relativament petits, a excepció dels corresponents a S.

Gràficament es compara l'aforament de l'Irati (afluent de l'Aragón) en el seu pas per Arive (núm. 72, amb dimensions similars a la mitjana dels 148 aforaments admesos en el mètode d'Altunin) amb la secció estable a partir de l'esquema de la Figura 10 que s'obté prenent valors mitjans a B_p i y_p (Figura 17).

Taula 17. Mitjanes de les variables de geometria hidràulica dels 148 aforaments dins dels intervals d'aplicabilitat d'Altunin (esquerra) i les corresponents de les prediccions (dreta). Font: elaboració pròpia.

	Mitjana valors reals (148 aforaments)	Mitjana valors predits (Altunin, 1962)
B (m)	13.32	8.31
y_m (m)	0.33	0.34
v_m (m/s)	0.47	0.74
S (-)	0.00416	0.00172

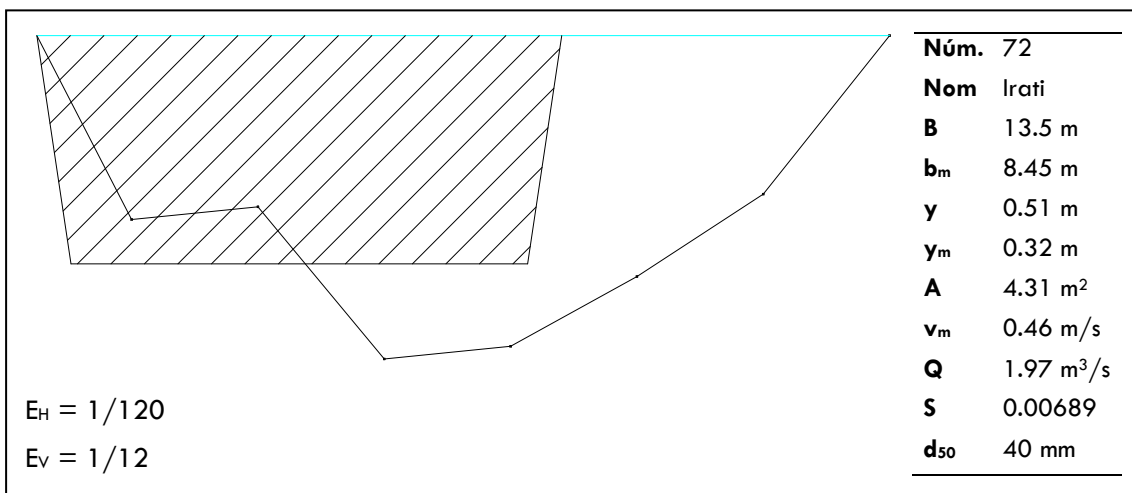


Figura 17. Comparació de la secció estable a partir dels resultats d'Altunin (ratllada) amb la secció de l'aforament a l'Irati (número 72) a Arive. La secció estable s'obté a partir de la Figura 10 i el talús és 2v:3h per ser àmpliament utilitzat i recomanat a la pràctica. L'escala vertical està exagerada en un factor 10. Font: elaboració pròpia.

Raonant igual com s'ha fet pel mètode de Simons i Albertson, és natural que les v_{mp} siguin superiors a les reals per tal de complir el principi de continuïtat. A l'introduir els valors mitjans (Taula 17) els cabals que s'obtenen són gairebé iguals.

$$Q_p = B_p \cdot y_{mp} \cdot v_{mp} = 2.07 \text{ m}^3/\text{s} \approx Q_r = B_r \cdot y_{mr} \cdot v_{mr} = 2.09 \text{ m}^3/\text{s} \quad [49]$$

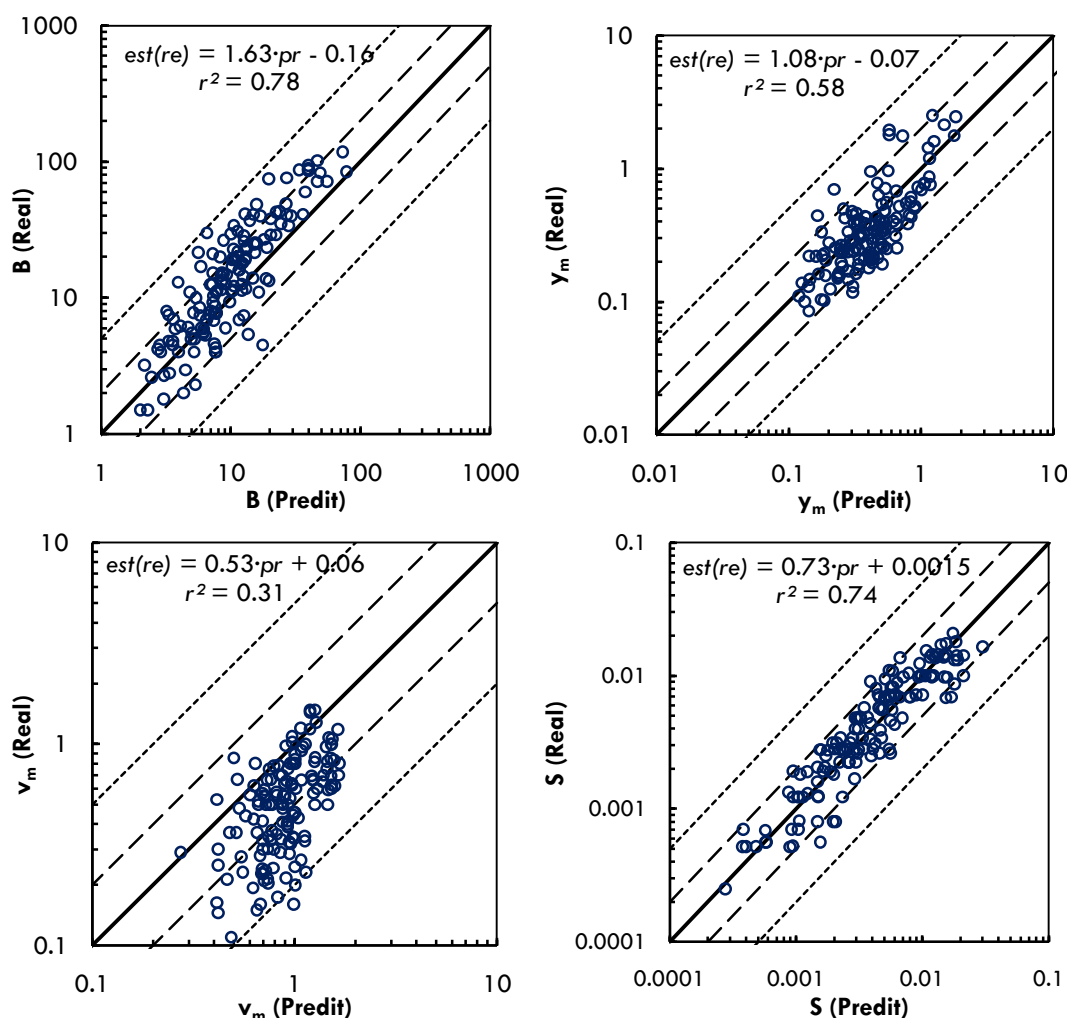
Els pendents predits són en la seva majoria inferiors als descrits al reconeixement. La consideració de tots els aforaments dels que es disposa com a vàlids per a aquest mètode, ha suposat introduir les dades de seccions que pertanyen a les capçaleres de diferents rius on els pendents són molt elevats en comparació amb els pendents dels rius en el seu tram mig o en

canals artificials. Aquest fet, juntament amb el caràcter inherentment pràctic del mètode d'Altunin pel que fa al disseny de canals, pot ajudar a explicar perquè tendeix a predir pendents estables significativament més suaus que els reals.

5.9.6 EQUACIONS DE LEE I JULIEN (2006)

Es mostren els resultats (Figura 18) que comparen l'amplada B , el calat mitjà y_m , la velocitat mitjana v_m , el pendent S i el paràmetre de Shields θ reals amb els corresponents valors predits per Lee i Julien (2006) dels 146 aforaments que resten dins dels intervals d'aplicabilitat pel mètode. Per a la comprensió de les gràfiques s'adjunta la taula amb els indicadors estadístics establerts (Taula 18).

Es recorda que els resultats en ambdues gràfiques $\theta_r - \theta_p$ i $S_r - S_p$ estan influenciats per les relacions entre les variables dependents i independents utilitzades (5.6).



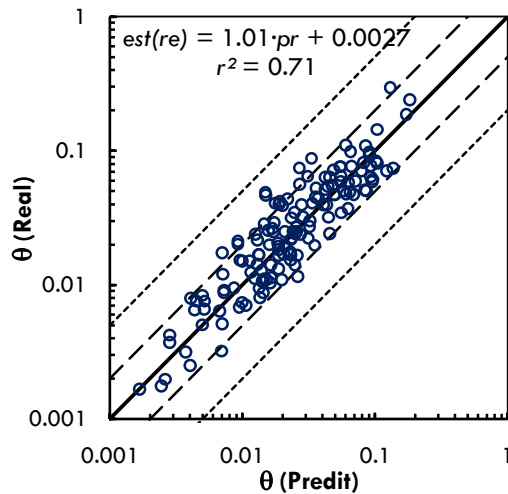


Figura 18. Comparació entre els valors de B , y_m , v_m , θ i S predits per Lee i Julien (2006) i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 146 aforaments. Font: elaboració pròpia.

Taula 18. Paràmetres de la regressió i indicadors estadístics emprats en l'anàlisi dels resultats utilitzant la formulació de Lee i Julien (2006). Font: elaboració pròpia.

		B	y_m	v_m	$S(\alpha)$	$\theta(\alpha)$
Lee i Julien	y -intersecció	-0.16	-0.07	0.06	0.0015	0.0027
	β	1.63	1.08	0.53	0.73	1.01
	r^2	0.78	0.58	0.31	0.74	0.71
	$DQMR$ (%)	116	85	99	4	90
	U	0.31	0.24	0.29	0.18	0.21
	U_b	0.28	0.01	0.64	0.00	0.02
	$U_{\beta=1}$	0.25	0.01	0.09	0.28	0.00
	U_e	0.47	0.98	0.27	0.72	0.98

(a) Els relatius bons resultats que s'observen poden ésser fruit de la relació entre les variables a les equacions del mètode (5.6).

5.9.7 DISCUSSIÓ

Els resultats presenten un aspecte similar als obtinguts pel mètode d'Altunin tot i les bones xifres del pendent, que són degudes en gran mesura a les relacions entre les variables a les equacions (5.6). Les magnituds de les $DQMR$ continuen essent significatives i els coeficients de desigualtat parcials de Theil són més variats: U_b és el major per a v_m (i presenta una proporció important per a B), mentre U_e és el major per a B , y_m , S i θ , essent els dos últims resultats no gaire significatius. La correspondència entre valors reals i predits és baixa tot i que millora respecte als anteriors mètodes. Ressalta el valor per a B $r^2 = 0.78$.

Les regressions lineals fetes mostren uns paràmetres de magnituds força acceptables exceptuant els corresponents a v_m , amb β propers a la unitat i y -intersecció relativament petits.

Tot i l'enfocament teòric del treball de Lee i Julien, es representen les dades mitjanes en forma de secció estable, seguint l'esquema de la Figura 10, que les seves equacions aboquen. Aquesta secció és comparada amb el mateix perfil transversal seleccionat per a representar els aforaments admesos en el mètode d'Altunin, l'Irati en el seu pas per Arive (núm. 72) (Figura 19).

Es pot observar que l'àrea ratllada, corresponent a les prediccions, és força similar a l'àrea real.

Taula 19. Mitjanes de les variables de geometria hidràulica dels 146 aforaments dins dels intervals d'aplicabilitat de Lee i Julien (esquerra) i les corresponents de les prediccions (dreta). Font: elaboració pròpia.

	Mitjana valors reals (146 aforaments)	Mitjana valors predits (Lee i Julien, 2006)
B (m)	13.52	9.85
y_m (m)	0.33	0.40
v_m (m/s)	0.48	0.89
S (-)	0.00400	0.00387
θ (-)	0.025	0.023

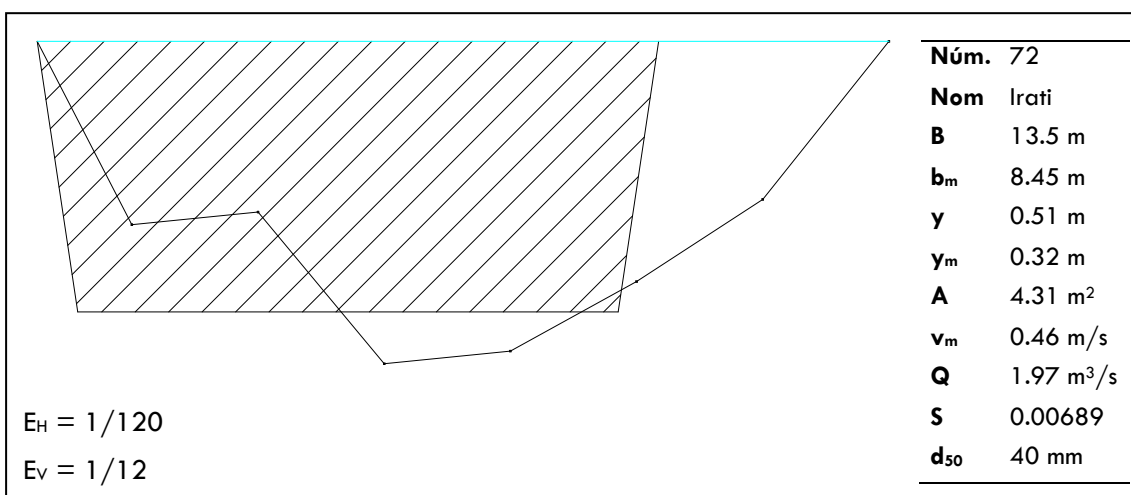


Figura 19. Comparació de la secció amb valors mitjans d'amplada i calat mitjà predita per les fórmules de Lee i Julien (ratllada) amb la secció de l'Irati en el seu pas per Arive (número 72). L'escala vertical està exagerada en un factor 10. Font: elaboració pròpia.

En aquest cas, malgrat la similitud en les dimensions, els errors i la mala correspondència en els resultats de v_m (DQMR = 85%, r² = 0.31) provoca que els cabals mitjans que hipotèticament circulen siguin diferents (de l'ordre del 40%).

$$Q_p = B_p \cdot y_{mp} \cdot v_{mp} = 3.51 \text{ m}^3/\text{s} \approx Q_r = B_r \cdot y_{mr} \cdot v_{mr} = 2.14 \text{ m}^3/\text{s}$$

En conclusió, tot i presentar uns resultats força correctes, la diferència és encara notable considerant l'ajust que els autors aconsegueixen amb la base de dades sobre la que han treballat (Lee i Julien, 2006). Per explicar aquesta desviació cal recórrer una altra vegada al

fet que els aforaments que apareixen en el reconeixement pertanyen a l'estiatge de la conca, i no a condicions de llera plena.

5.9.8 FORMULACIÓ DE PARKER ET AL. (2007)

Es mostren els resultats (Figura 20) que comparen l'amplada B , el calat mitjà y_m i el pendent S reals amb els corresponents valors predits per les equacions dimensionalment homogènies de Parker *et al.* dels 58 aforaments que resten dins dels intervals d'aplicabilitat pel mètode. Per a la comprensió de les gràfiques s'adjunta la taula amb els indicadors estadístics establerts (Taula 20).

La gràfica amb la comparació $v_{mr}-v_{mp}$ no ha estat calculat per manca de l'equació que així ho permeti.

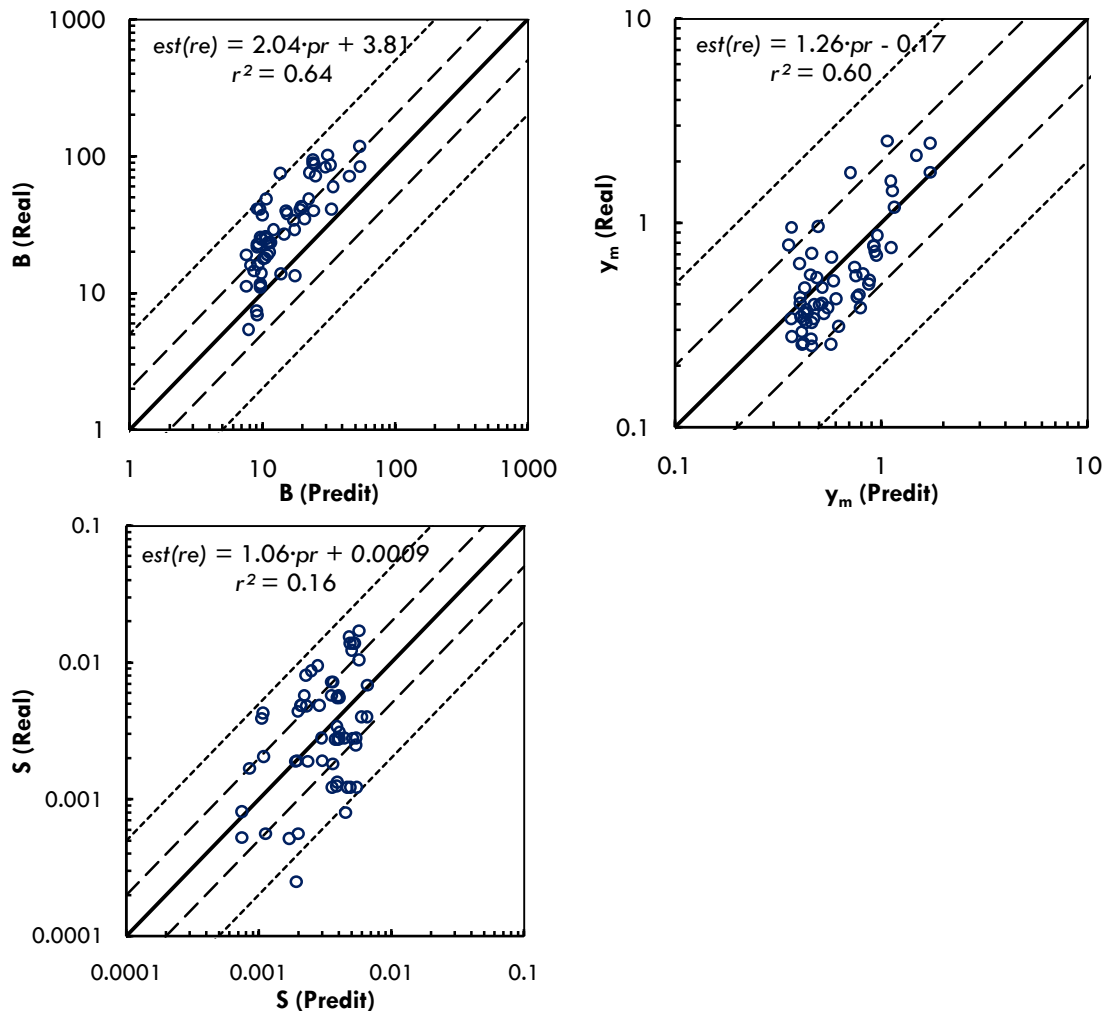


Figura 20. Comparació entre els valors de B , y_m i S predits pel mètode de Parker *et al.* (2007) i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 58 aforaments. Font: elaboració pròpia.

Taula 20. Paràmetres de la regressió i indicadors estadístics emprats en l'anàlisi dels resultats utilitzant la formulació de Parker et al. (2007). Font: elaboració pròpia.

		B	y_m	S
	y-intersecció	3.81	-0.17	0.0009
	β	2.04	1.26	1.06
	r^2	0.64	0.60	0.16
Parker et al.	DQMR (%)	98	63	130
	U	0.44	0.22	0.39
	U _b	0.54	0.00	0.08
	U _{$\beta=1$}	0.15	0.06	0.00
	U _e	0.32	0.94	0.92

5.9.9 DISCUSSIÓ

Els resultats empitjoren al respecte de les millores anteriorment observades. L'objectiu final de Parker et al. de copsar el significat teòric dels coeficients de les equacions que presenta, sembla haver minvat la capacitat predictiva. Les DQMR són més grans i els r^2 disminueixen. Tot i així, U_e és el coeficient que presenta més proporció per a y_m i S, essent U_b el principal per a B. Les tendències en les regressions calculades és la mateixa que en els mètodes anteriors:

- Lleres predites més estretes en general ($\beta = 2.04$ i $y_{int} = 3.81$ m).
- Calats força semblants, tot i la tendència a subestimar els valors reals a mesura que les magnituds augmenten ($\beta = 1.26$ i $y_{int} = -0.17$ m).
- Força dispersió ($r^2 = 0.16$) en el pendent tot i presentar un valor mitjà gairebé idèntic a la mitjana real.

Aquestes similituds entre els quatre mètodes permeten intuir un comportament especial dels paràmetres dels aforaments, des de les capçaleres dels afluents fins a la desembocadura al Mediterrani, que és degut a l'estiatge i que s'analitza en el següent apartat.

Abans, per coherència, es representen en forma de secció estable, seguint l'esquema de la Figura 10, les dades mitjanes que les equacions de Parker et al. aboquen. En aquest cas és la secció del riu Ebre en el seu pas per Pangusió la que millor s'aproxima a les mitjanes dels aforaments admesos. En la Taula 21 es resumeixen els valors mitjans obtinguts.

La comparació entre ambdues seccions, predita i real, deixa entreveure que la simplicitat en la formulació facilita l'anàlisi teòric posterior per una banda (Parker et al., 2007), però per l'altra sembla fer-ho en detriment de l'exactitud dels resultats.

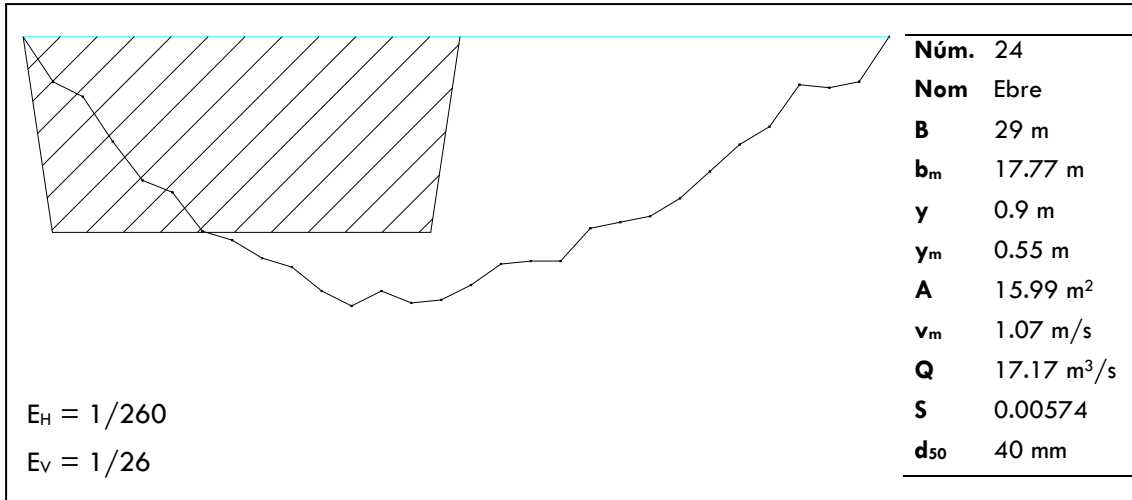


Figura 21. Comparació de la secció amb valors mitjans d'amplada i calat mitjà predita per les fórmules de Parker et al. (ratllada) amb la secció de l'Ebre en el seu pas per Pangusón (número 24). L'escala vertical està exagerada en un factor 10. Font: elaboració pròpia.

Finalitzant, per tal que els cabals en tots dos casos siguin els mateixos la velocitat predita per Parker et al. en cas de proposar un mètode per al seu càlcul hauria d'ésser de 1.14 m/s, és a dir, gairebé el doble de la mesurada per D. Pedro Antonio.

$$Q_p = B_p \cdot y_{mp} \cdot v_{mp} = 8.92 \cdot v_{mp} \text{ m}^3/\text{s} \approx Q_r = B_r \cdot y_{mr} \cdot v_{mr} = 10.21 \text{ m}^3/\text{s}$$

Taula 21. Mitjanes de les variables de geometria hidràulica dels 58 aforaments dins dels intervals d'aplicabilitat de Lee i Julien (esquerra) i les corresponents de les prediccions (dreta). Font: elaboració pròpia.

	Aforaments admesos	Parker et al.
Amplada (m)	29.93	14.63
Profunditat mitjana (m)	0.55	0.61
Velocitat mitjana (m/s)	0.62	-
Pendent (-)	0.00302	0.00301

5.9.10 PARKER MODIFICAT

Finalment es mostren els resultats (Figura 22) que comparen l'amplada B , el calat mitjà y_m i el pendent S real amb els corresponents predits per les equacions de Parker modificat (a partir del mètode de Parker et al., 2007) dels 148 aforaments disponibles. Igualment, s'adjunta la taula amb el valor dels indicadors estadístics emprats en anteriors mètodes (Taula 22).

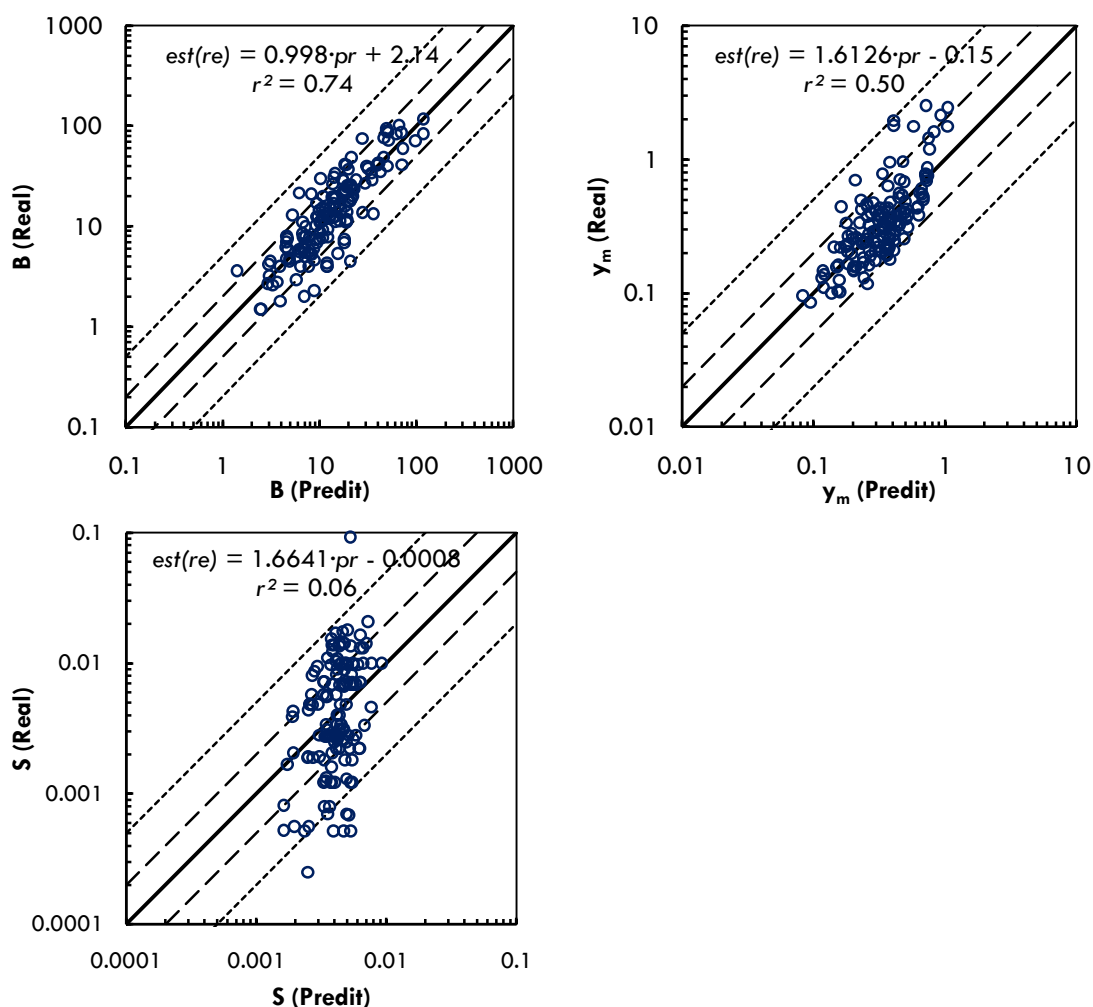


Figura 22. Comparació entre els valors de B , y_m i S predits per Parker modificat i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 148 aforaments. Font: elaboració pròpia.

Taula 22. Paràmetres de la regressió i indicadors estadístics emprats en l'anàlisi dels resultats utilitzant la formulació de Parker modificat. Font: elaboració pròpia.

		B	y_m	S
Parker modificat	y-intersecció	2.14	-0.15	0.0008
	β	1.00	1.61	1.66
	r^2	0.74	0.50	0.06
	DQMR (%)	89	101	205
	U	0.20	0.33	0.57
	U_b	0.03	0.05	0.06
	$U_{\beta=1}$	0.00	0.12	0.01
	U_e	0.97	0.83	0.93

5.9.11 DISCUSSIÓ

Aquests resultats es comparen amb els obtinguts utilitzant la formulació Parker *et al.* (Taula 20) per comprovar si s'han produït canvis rellevants.

Exceptuant B , amb una millora significativa, la formulació sembla empitjorar a l'hora de predir y_m i S . El motiu d'aquest comportament pot ésser degut a que únicament 58 aforaments són utilitzats a Parker *et al.*, mentre que a Parker modificat ho són els 148 que se'n disposa, amb tota la disparitat de valors conformen (Taula 6). El terme U_e continua essent el major i, per tant, pot indicar que els mal resultats de y_m i S són deguts a les mateixes dades reals utilitzades, la dispersió de les quals és molt gran. D'altra banda, els resultats de B són més optimistes i l'expressió que la defineix [44] és la que s'hauria de tenir més present.

La comparació de les equacions [38] – [40] de Parker *et al.* amb les equacions [44] – [46] de Parker modificat ressalta els trets característics de cadascuna:

1. Amplada B (equacions [38] i [44]): les relacions són força similars. No obstant, amb Parker modificat ($n_B = -0.086$ i $\alpha_B = 7.647$) les amplades predites seran més amples en comparació amb Parker *et al.* Està d'acord amb els resultats aconseguits fins ara.
2. Calat mitjà y_m (equacions [39] i [45]): Parker *et al.* proposa finalment una expressió que depèn exclusivament del cabal dominant. Aquest raonament no pot ser aplicat amb Parker modificat tot i que el nou valor de $n_{ym} = -0.084$ sigui molt petit. Sembla ser, doncs, que la granulometria del material no contribueix de manera decisiva en el calat en condicions de llera plena en rius de grava i que, en canvi, sí està determinat pel cabal dominant que hi circula.
3. Pendent S (equacions [40] i [46]): els exponents i coeficients en ambdues expressions divergeixen significativament ($n_S = -0.0156$ i -0.344 i $\alpha_S = 0.015$ i 0.101 per a Parker modificat i Parker *et al.*, respectivament). Aquesta circumstància traça una regressió que en el cas de Parker *et al.* té una inclinació més pronunciada i per a Parker modificat és més horitzontal. És a dir, el pendent és menys susceptible a variar amb el cabal en aigües baixes tal i com, presumiblement, ho fa en condicions de llera plena.

Al respecte del tercer punt, cert és que els pendents citats per D. Pedro Antonio en el reconeixement són deduïts dels valors presents en les cartes de l'època o per observacions directes en cas de no existir-ne (i que succeïa quan es vorejava els afluents menys importants). El mateix D. Pedro Antonio els corregia amb *coeficients de sinuositat* (per comparació de la longitud real de l'Ebre entre Saragossa i la desembocadura de la que ofereixen les cartes) per tal de “(sic) aprocsimarnos (sic) á la exactitud en las pendientes” (de Mesa Arroquia, 1865).

La sinuositat dels corrents en època d'estiatge és generalment més marcada que en condicions de llera plena degut a la circulació de l'aigua pel tàlveg que alhora presenta un recorregut més llarg i que tot plegat causa que el pendent disminueixi (Figura 23). Aquest fenomen col·labora en la justificació del perquè de la variació del pendent en un interval més petit de magnituds segons l'equació proposada per a les dades de l'Ebre.

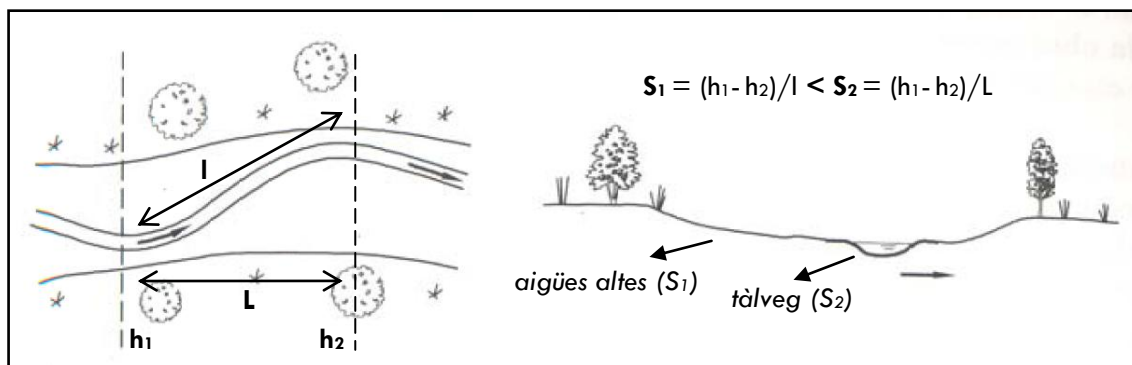


Figura 23. Representació de la llera d'aigües baixes en un riu i la influència en el pendent. Font: modificat de Martín Vide (2002).

Tal i com s'ha descrit, els aforaments (i així les observacions del pendent) en la regió superior i mitja es van dur a terme en ple estiatge de la conca fluvial de l'Ebre i, per tant, quan la circulació de l'aigua pel tàlveg podia ser més acusada i més petit aleshores el pendent. En canvi, però, a mesura que l'equip s'aproximava a la desembocadura de l'Ebre l'estació avançava i els cabals podien haver augmentat al rebre les aportacions d'aigua de les primeres pluges causant, en definitiva, una mitigació del fenomen descrit en el paràgraf anterior. En resum, es podria haver produït un efecte homogeneïtzador dels pendents mesurats.

5.9.12 EVOLUCIÓ DE LES DIFERÈNCIES ENTRE VALORS REALS I PREDITS

Com que l'aplicació de les diferents formulacions s'ha realitzat partint de la falsa hipòtesis que les dades disponibles corresponien a lleres en condicions d'aigües altes, s'estudia quina és l'evolució de les diferències entre els valors reals i predits en forma d'*error relatiu* (Figura 24). Es mostren els gràfics corresponents a B i y_m . Els corresponents a v_m i S es troben a l'Annex C.

Es comprova com les diferències per a B són majoritàriament positives, és a dir, el valor real és major que el predit. Tot i així, pels valors més petits de B_r sembla haver una dispersió força gran i alguns errors negatius indiquen el contrari, malgrat per B_r més grans. En la gràfica de y_m sembla produir-se el fenomen oposat: són majoritaris els errors negatius, és a dir, els valors predits són majors que els reals. En ambdues gràfiques, però, s'observa el mateix comportament pels valors reals més grans: els errors semblen estabilitzar-se al voltant del 50% positiu.

Les gràfiques de v_m i S presenten unes formes semblants a B i y_m , respectivament, amb una tendència a estabilitzar els errors per a magnituds més elevades.

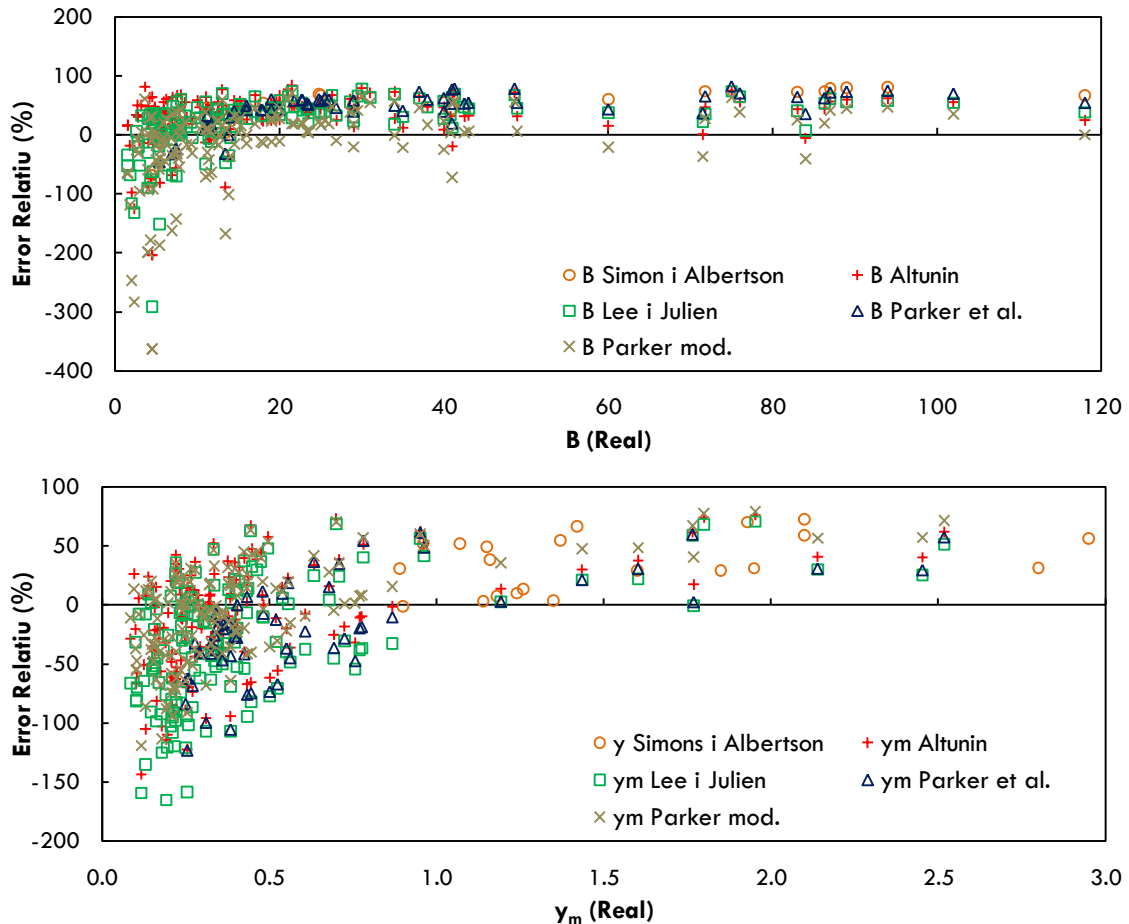


Figura 24. Diferències entre els valors calculats a partir de les diferents formulacions (Simons i Albertson, Altunin, Lee i Julien, Parker et al. i Parker modificat) i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio de B i y_m pels aforaments que s'accepten a cada mètode. S'expressa en forma d'error relatiu (ER). $ER > 0$ indica que el valor real és major que el predit, $ER < 0$ indica que el valor predit és major que el real. *L'ER de Simons i Albertson són pel calat màxim y i no pel calat mitjà y_m . Font: elaboració pròpia.

Resumint, als valors de B_r i y_{mr} més petits els hi corresponen els B_p i y_{mp} més amples i poc profunds, respectivament, característica que sembla desaparèixer per a valors més grans, en tant que B_p i y_{mp} acaben essent ambdós majors que els reals. Aquestes idees es desenvolupen més endavant quan s'avaluen els resultats d' y_m i B conjuntament, és a dir, com a elements d'un aforament i no com a mesures independents.

Altunin i de Lee i Julien són els que més s'aproximen a l'error nul i, per tant, els que millor representen la realitat del reconeixement de 1863.

5.9.13 CARACTERÍSTIQUES DE L'ESTIATGE A LA VALL DE L'EBRE

Arribat a aquest punt, cal preguntar-se si es tenen suficients indicis per a poder obtenir alguna conclusió sobre la geometria fluvial que presenten en general els aforaments presents en el reconeixement.

Tal i com s'ha anat observant en les gràfiques de les evolucions de l'amplada i el calat, les fórmules aboquen xifres superiors a les mesurades pels B i y_m més petits dels aforaments i, a la inversa, proporcionen magnituds inferiors pels B i y_m més grans. Però quina relació mantenen els paràmetres B i y_m en una mateixa secció? Hi ha alguna proporcionalitat entre B_r/B_p i y_{mr}/y_{mp} (on r fa referència a les dades del reconeixement i p a les dades predites pels mètodes)?

Entre els mètodes aplicats, s'escull la formulació de Lee i Julien (2006) per a extreure les respostes necessàries. No obstant, Altunin (1962) presenta uns resultats força similars. La simplicitat en les equacions i l'amplitud dels intervals d'aplicabilitat (apartat 5.6) han acabat fent decantar l'elecció. Altunin, a més, incorpora unes variables de definició poc rigorosa (α , α , K) que requereixen d'un coneixement dels aforaments de la vall de l'Ebre difícil d'aconseguir.

El procediment que es segueix és, en primer lloc, trobar els valors dels quocients entre B_r/B_p i y_{mr}/y_{mp} i la magnitud de la seva diferència. Alhora, es computa la secció mullada predita com $B_p \cdot y_{mp}$ i es calcula també el valor de A_r/A_p i v_{mr}/v_{mp} .

Ordenant les magnituds del quocient B_r/B_p de menor a major s'observa que els mínims es corresponen amb alguns dels màxims en el quocient y_{mr}/y_{mp} . De la mateixa manera, a mesura que B_r/B_p augmenta els valors de y_{mr}/y_{mp} disminueixen generalment.

El mateix succeeix si s'ordenen les magnituds de y_{mr}/y_{mp} de menor a major. Els mínims corresponen a màxims en B_r/B_p i a la inversa. L'expressió [50] ho resumeix i s'adjunta una taula amb els percentatges de les amplades, calats, seccions mullades i velocitats mitjanes reals que són superiors, iguals o inferiors als obtinguts on queden reflectides aquests resultats.

$$B_r / B_p \uparrow (\downarrow) \approx y_{mr} / y_{mp} \downarrow (\uparrow) \quad [50]$$

Taula 23. Percentatges de les amplades, calats i seccions mullades reals (R) que són superiors, iguals o inferiors als predits pel mètode de Lee i Julien (P). El criteri perquè $R = P$ és: $R = P \pm 0.05 \cdot P$. Font: elaboració pròpia.

	B	y_m	A	v_m	S
R > P	73%	27%	51%	8%	51%
R = P	8%	9%	12%	4%	9%
R < P	19%	64%	37%	88%	40%

Focalitzant ara l'interès en la variació dels quocient A_r/A_p i v_{mr}/v_{mp} s'observa com les diferències entre porcions de les seccions mullades són més petites corroborant l'abans exposat que a seccions estables més amples que les reals els hi pertoca calats menys profunds i a la inversa. De fet, en únicament 13 dels 148 aforaments (9% del total) les seccions mullades predites es troben fora de l'interval 0.5 – 2 vegades els valors reals. A la Figura 25 es comparen els valors reals amb els predits de les seccions mullades A. Si es compara amb les gràfiques de B i y_m ($A=B \cdot y_m$) (Figura 18) es comprova com en aquesta nova gràfica les diferències semblen compensar-se.

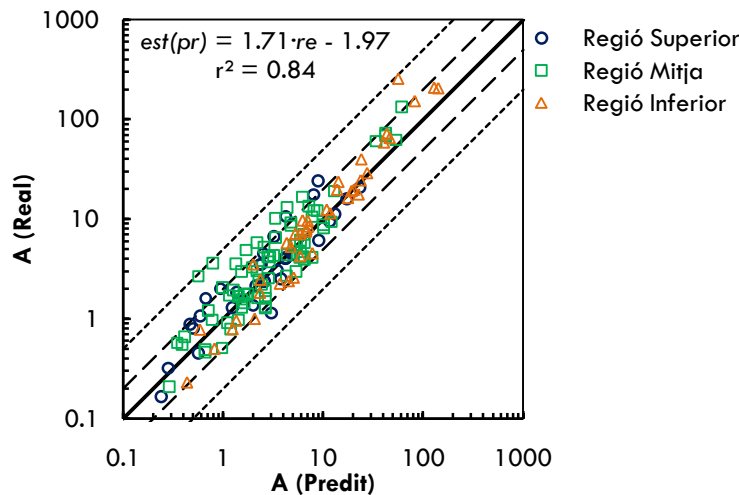


Figura 25. Comparació entre els valors de A predits per Lee i Julien i els valors reals mesurats per D. Pedro Antonio. Eixos logarítmics. Les rectes de regressió i els coeficients de determinació es mostren en les gràfiques. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 148 aforaments. r^2 augmenta al respecte de les gràfiques de γ_{mr}/γ_{mp} i B_r/B_p . Font: elaboració pròpia.

Per la seva banda la velocitat mitjana, tal i com es sap pels resultats obtinguts en els diferents mètodes, és majoritàriament superior que la mesurada en el reconeixement. Dues hipòtesis poden influir en aquests resultats:

1. La primera és com a conseqüència de l'obtenció de calats predits majoritàriament superiors als reals. Aplicant una de les formulacions de resistència al flux com la de Manning i mantenint la resta de variables constants, indica un creixement de la velocitat mitjana. Cal tenir en compte, a més, que una proporció important dels pendents predits són encara més pronunciats que els reals i, per tant, també poden haver col·laborat en augmentar la velocitat mitjana que, es recorda, s'ha obtingut a partir de la calibració d'una regressió lineal.
2. La segona parteix des del punt de vista que la correspondència quasi perfecta entre els màxims (i mínims) del ràtio A_r/A_p amb els mínims (i màxims) de v_{mr}/v_{mp} pot ésser explicat pel principi de continuïtat: el cabal s'ha de mantindre. Així doncs si la secció mullada predita és menor (major) cal que l'aigua que hi circula ho faci amb una velocitat superior (inferior).

La magnitud de la diferència entre B_r/B_p i γ_{mr}/γ_{mp} és un bon indicador de possibles aforaments que presenten unes seccions proporcionals a les teòriques estables malgrat que el valor de la superfície mullada divergeixi significativament, és a dir que $\gamma_{mr}/\gamma_{mp} \approx B_r/B_p$ tot i que $A_r \neq A_p$. Dins del rang de $\pm 10\%$ de marge són poques les seccions que s'ajusten a aquest criteri d'igualtat (únicament el 9%) i la majoria són seccions més grans que les estables (9 aforaments dels 13). La Figura 26 recull quatre d'aquestes seccions de dimensions proporcionals a les estables. És remarcable que cap secció compleixi la igualtat $\gamma_{mr}/\gamma_{mp} \approx B_r/B_p \approx A_r/A_p \approx 1$ dins d'un marge de variació del $\pm 5\%$ ($R/P = 1 \pm 0.05$).

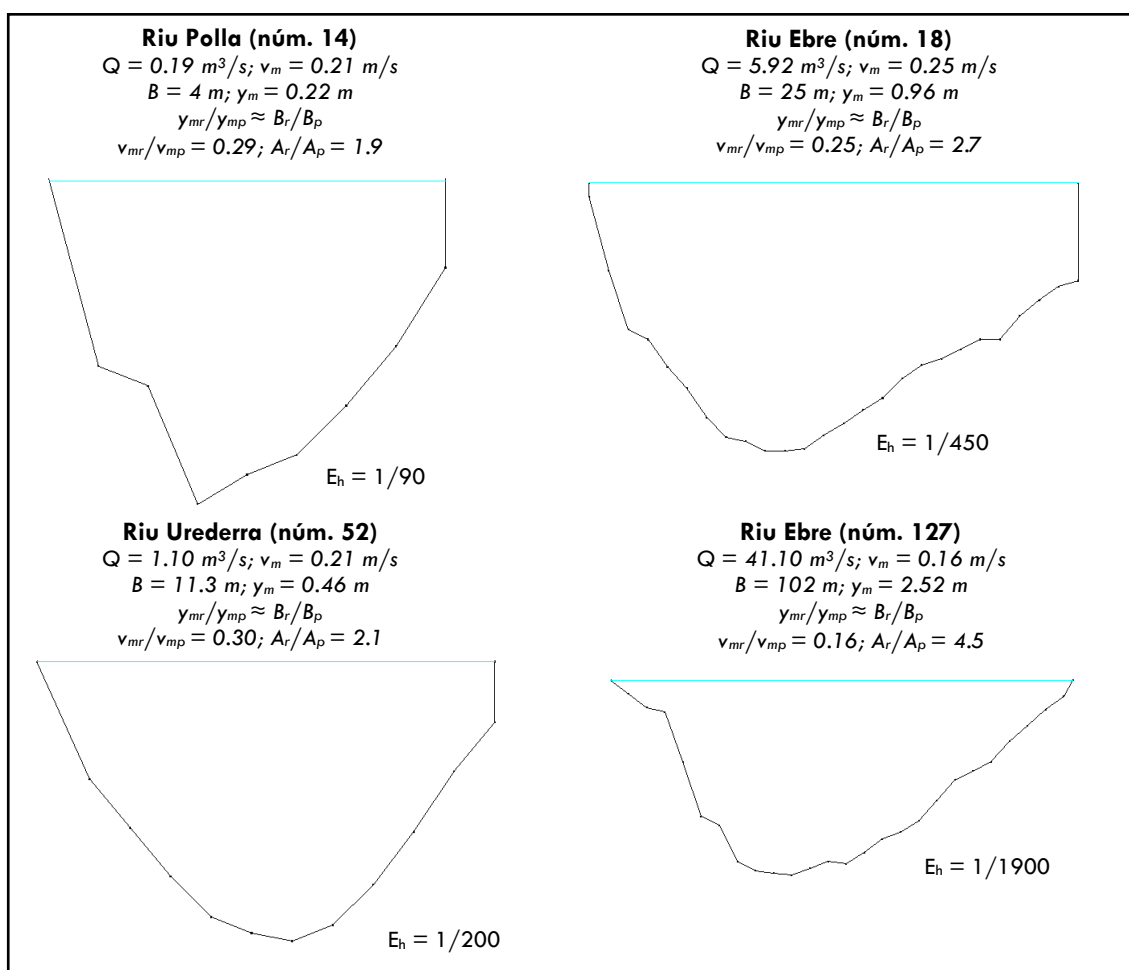


Figura 26. Perfils transversals reals de dimensions proporcionals a les teòriques d'equilibri o estables: $y_{mr}/y_{mp} \approx B_r/B_p$ però $A_r \neq A_p$. L'escala vertical està exagerada en un factor 10. Font: elaboració pròpia.

5.9.14 ANÀLISI DE LES SECCIONS TRANSVERSALS DE LA VALL DE L'EBRE EN L'ESTIATGE

Si abans s'han tingut en compte la totalitat dels aforaments, ara s'agrupen tots els múltiples (*) En els annexes D, E i F es completa la informació individual de cada aforament.

Taula 2) d'acord amb la numeració presentada per D. Pedro Antonio (Taula 1). L'objectiu és copsar la configuració de la conca de forma global.

Amb tota la informació que s'extreu dels paràgrafs anteriors es poden classificar les seccions dels aforaments de la conca de l'Ebre en estiatge en relació a les seccions de dimensions estables o en règim (en particular les seccions abocades per la formulació de Lee i Julien). Amb aquesta finalitat es defineixen quatre geometries hidràuliques generals en les quals s'agrupen els diversos aforaments segons el grup al que pertanyen (Taula 24): seccions transversals més amples però menys profundes, més amples i profundes, més estretes i profundes i més estretes però menys profundes.

Les seccions transversals dins d'un aforament múltiple presenten una mateixa configuració estable, amb excepció dels aforaments múltiples al Glera (núm. 39), al Salado (núm. 71) i al

Queiles (núm. 82), en els quals s'ha escollit el braç principal, la secció aigües amunt i la secció del centre, respectivament, com a seccions representatives per a definir la configuració estable de l'aforament.

Taula 24. Geometries hidràuliques trobades als aforaments de D. Pedro Antonio respecte de les teòriques estables. Entre parèntesis el percentatge respecte del total de cada regió. Fons: elaboració pròpia a partir de Mesa Arroquia (1865).

Configuració de la secció real al respecte de la teòrica estable	Número d'aforaments			
	Regió Superior	Regió Mitja	Regió Inferior	Total
Més ampla però menys profunda	10 (37%)	38 (59%)	27 (71%)	75 (58%)
Més ampla i profunda	12 (44%)	12 (19%)	6 (16%)	30 (23%)
Més estreta i profunda	1 (4%)	8 (13%)	1 (3%)	10 (8%)
Més estreta però menys profunda	4 (15%)	6 (9%)	4 (10%)	14 (11%)
	27	64	38	129

I en els límits entre cada grup és on es troben els 13 aforaments de dimensions proporcionals a les teòriques estables descrits anteriorment. Les dades de la Taula 24 es representen en la següent gràfica, en la que l'eix de coordenades correspon al quocient y_{mr}/y_{mp} i l'eix d'abscisses al quocient B_r/B_p . Cadascun dels quatre quadrants en els que la gràfica queda dividida defineix una configuració real al respecte de la teòrica estable. El quadrant de sota a la dreta és el que presenta més densitat, tal i com queda reflectit a la Taula 24.

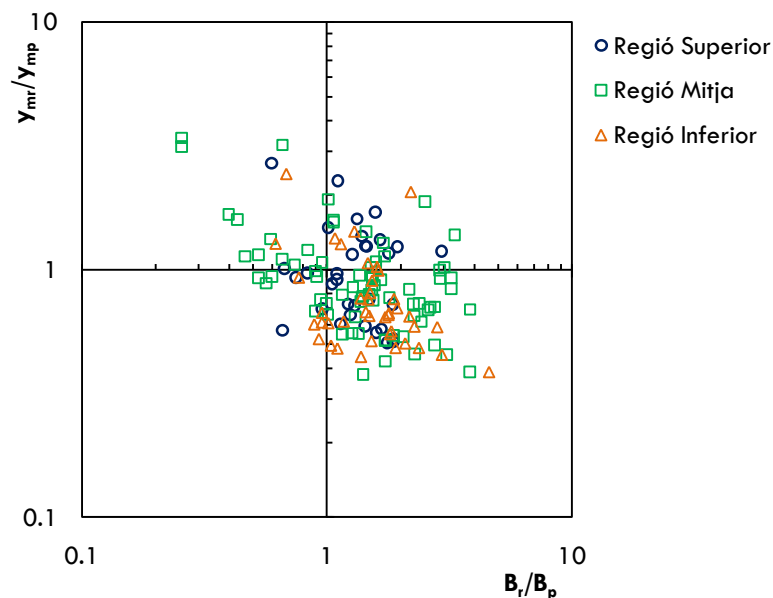


Figura 27. Comparació entre els quocients B_r/B_p i y_{mr}/y_{mp} . Les línies que es creuen centrals marquen la igualtat. La gràfica queda dividida en quatre quadrants. D'esquerra a dreta i d'amunt a avall: secció transversal més ampla però més estreta, més ampla i més profunda, menys profunda i més estreta i més ampla però menys profunda. Eixos logarítmics. Es representen 148 aforaments. Font: elaboració pròpia.

És clar el domini de les seccions més amples i menys profundes (gairebé el 60% del total d'aforaments) i presenten un especial interès les seccions més estretes i més o menys profundes per la idea subjacent de comprendre una llera específica d'aigües baixes.

Relacionant la forma amb els cabals ambientals, en els que s'aprofundeix en el següent apartat, les seccions més amples i menys profundes són les que en general presenten les magnituds més grans de perímetre mullat i, per tant, són menys susceptibles a oferir les condicions en estiatge més severes per a les espècies autòctones. A la inversa, les seccions més estretes i profundes es corresponen amb perímetres mullats més petits. Dividint l'anàlisi per regions:

- I. *Regió superior*: semblen predominar les seccions més grans que les predites estables. Es poden formular hipòtesis que expliquin aquest comportament. És important, però, tenir present que l'orografia és molt abrupta, amb punts on el riu circula encaixat travessant diversos estrets així com també és provable que algun aforament compregui lleres rocoses o fins i tot trams on el riu segueixi seqüències en graons o de ràpids i basses que desvirtuen i fan erronis els resultats de les equacions.

És agosarat, doncs, aventurar que en el supòsit que els cabals aquí considerats es corresponguin amb els formatius l'evolució que presenti la llera sigui la de disminuir les seves dimensions a costa d'augmentar la velocitat mitjana. Aquesta última variable de magnituds baixes i les dimensions de les seccions relativament grans, són l'origen de la sospita que D. Pedro Antonio hagués efectuat l'aforament dels rius en trams on les aigües s'alenteixen i ocupen una major superfície com ho fan a les basses. Les seqüències de ràpids i basses (Figura 28), de formació típica en rius de grava i més presents en aigües baixes, combinen la presència de zones poc profundes on l'aigua circula amb una velocitat elevada i la llera es conforma per graves i còdols (*ràpids*) amb zones més profundes de velocitat reduïda on el substrat de la llera és més fi (*basses*), fenomen que dificulta la determinació de la posició de l'aforament òptim representatiu del tram o riu considerat.

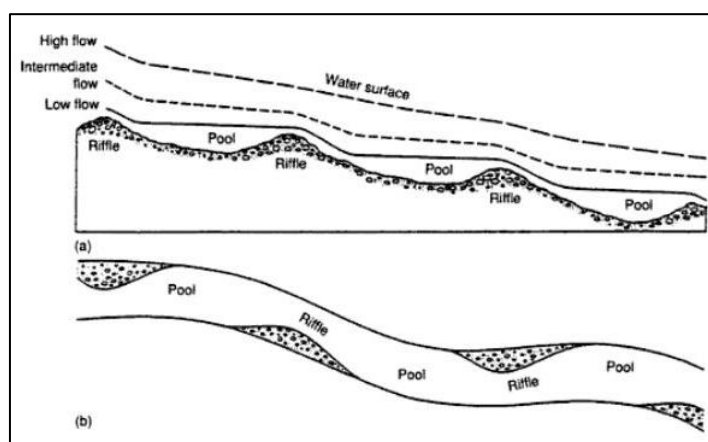


Figura 28. Perfil longitudinal (a) i planta (b) d'una seqüència de ràpids i basses (*step-pool*). En (a) s'observa gràficament com en aigües baixes aquest fenomen és més acusat. Font: Dunne i Leopold (1978).

En la regió superior és també significativa la proporció de seccions més amples però menys profundes, tot i que es deixa la seva explicació per a la següent regió. La proporció de seccions més estretes no es considera prou rellevant per extreure'n conclusions, tot i que destaca el fet que 4 dels 5 aforaments corresponguin a afluents directes de l'Ebre en la seva desembocadura.

- II. *Regió mitja*: predominen els aforaments amb seccions més amples però menys profundes i a on l'aigua hi circula més lentament. Aquesta circumstància es relaciona directament amb la característica d'haver aforat el riu en aigües baixes. Mentre aquests cabals considerats dominants haurien ocupat segurament una secció de formes més proporcionades (i per tant els resultats s'haurien apropat més als predits), en aigües baixes la llera força a l'aigua a circular mullant la màxima superfície a costa de disminuir el calat. Es pot argumentar com una mesura d'autodefensa del riu en el seu estiatge per tal de preservar la biòtica de la zona, en el benentès que la llera ha evolucionat fins a presentar una secció —a falta de més dades— favorable per a la preservació dels organismes que hi habiten. En aquest cas sembla poc provable la presència d'una llera ben definida per a les aigües baixes.

Gràficament es presenta l'aforament al riu Cruceo (número 7) que en la seva desembocadura a l'Ebre té una forma proporcional a la teòrica estable que permet imaginar que és la superfície que ocuparia un cabal dominant Q . En aquestes circumstàncies, un cabal inferior q_1 ocuparia la secció A_1 (Figura 30.a). Com que el mètode per a determinar les dimensions en règim ha estat desenvolupat amb cabals dominants (5.6) és comprensible que a l'introduir el mateix cabal Q_1 proporcioni una secció semblant a la A_2 (Figura 30.b) que manté les proporcions³⁰.

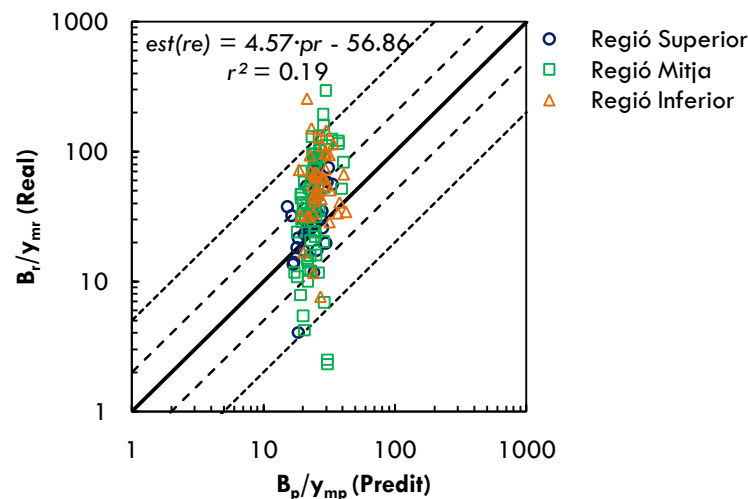


Figura 29. Relació de forma (B/y_m) real i predita segons Lee i Julien (2006). Eixos logarítmics. Tot i la baixa correlació entre els valors reals i predits ($r^2 = 0.18$) la tendència és clara i la majoria dels

³⁰ En aquest raonament no s'omet que les equacions de Lee i Julien (2006) que proporcionen les dimensions depenen de Q , d_{50} i S . Mantenint d_{50} igual, però, tant B com y_m depenen en una major proporció exclusivament de Q (veure Taula 8).

resultats (75%) indiquen $(B_r/y_{mr}) > (B_p/y_{mp})$. El significat de les diagonals s'explica a 5.9.1. Es representen 148 aforaments. Font: elaboració pròpia.

La comparació entre els valors predits i reals del quocient B/y_{mr} , anomenat *relació de forma*, demostra que els punts aforats en la vall de l'Ebre semblen presentar uns perfils transversals majoritàriament més amples i poc profunds que el de les corresponents seccions predites (Figura 29). Comparant A_1 amb A_2 es comprova com A_1 és relativament molt més ampla tot i presentar un calat semblant o inferior, tret que presumptament succeeix en la majoria d'aforaments.

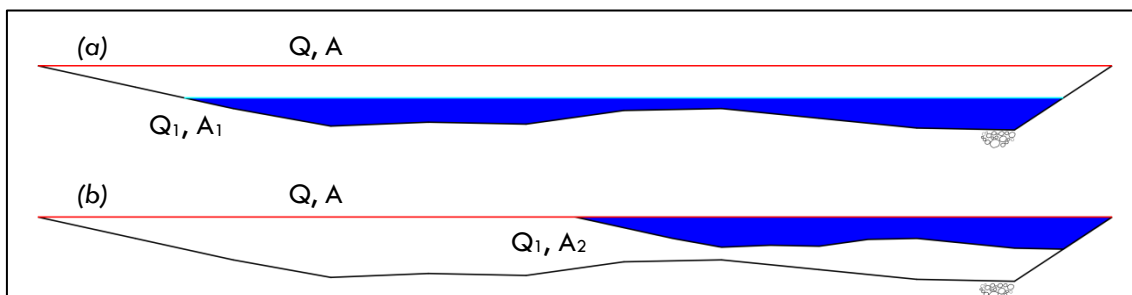


Figura 30. Aforament al Cruceo amb forma proporcional a la teòrica estable. Amunt i en blau: superfície que ocuparia un hipotètic cabal $Q_1 < Q$. Avall i en blau: secció comprensiblement abocada per les equacions. Escala no exagerada en cap eix. Font: elaboració pròpia.

El nombre d'aforaments amb seccions més estretes que les predites indiquen indicis de la formació en alguns trams d'una llera específica per a l'estiatge. És alhora en aquests indrets on les velocitats mitjanes mesurades són relativament les majors respecte de les predites, com així queda palès en la següent gràfica on a mesura que v_{mr}/v_{mp} disminueix, B_r/B_p augmenta.

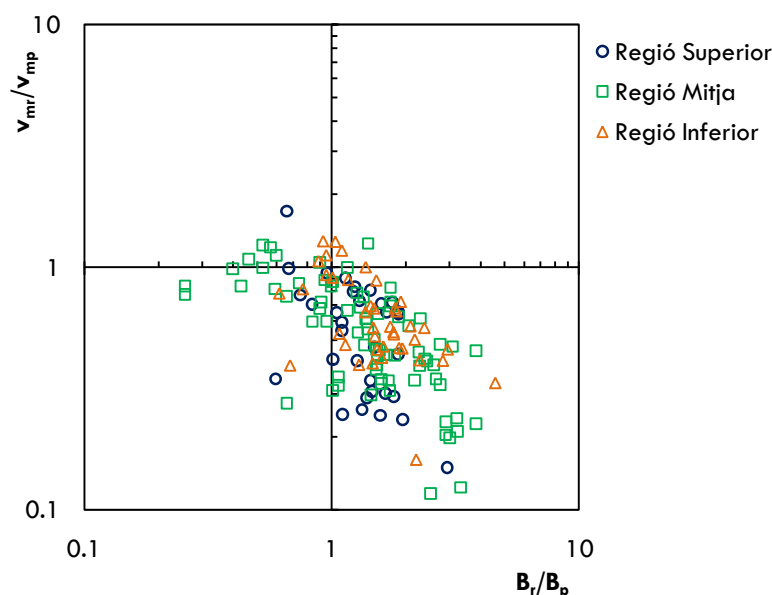


Figura 31. Comparació entre els quocients v_{mr}/v_{mp} i B_r/B_p . Les línies que es creuen centrals marquen la igualtat. Les v_{mr} majors corresponen a les B_r més petites. Eixos logarítmics. Es representen 148 aforaments. Font: elaboració pròpia.

Malgrat la manca d'informació que permeti distingir clarament entre les lleres encaixades en un substrat rocós de les realment al·luvials en les que les aigües baixes segueixen un recorregut més sinuós disminuint el pendent (el dibuix de les seccions contempla exclusivament la secció mullada), es pot suposar l'existència d'aquestes lleres d'estiatge ben definides en diversos aforaments. Un cas particular es produeix en la zona propera a la desembocadura del riu Urederra a l'Ega. Ambdós aforaments (números 49 i 53) (en cada riu aigües amunt de la confluència) presenten seccions més estretes i calats mitjans similars als suposats estables. Observant les seccions (Figura 32) és possible imaginar una factible projecció de la línia del fons cap els marges que conformi una veritable secció d'aigües baixes.

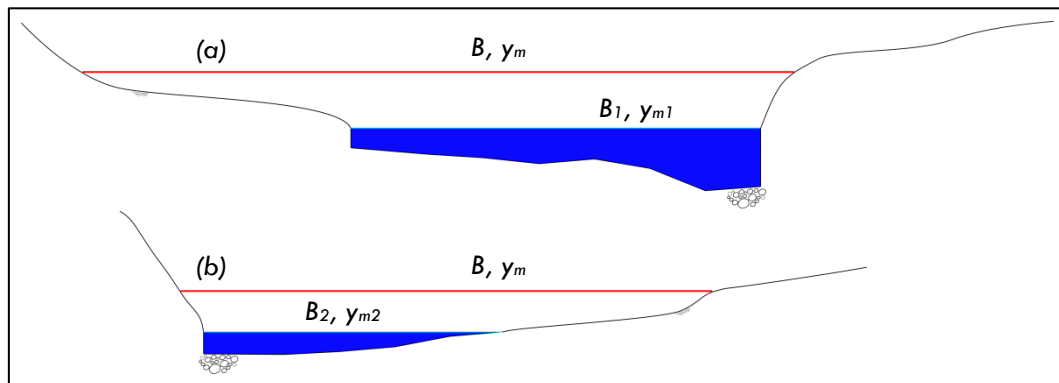


Figura 32. Amunt i ratllat: aforament a l'Ega (núm. 49). Avall i ratllat: aforament a l'Urederra en la desembocadura a l'Ega (núm. 53). Els marges més enllà de la secció mullada són hipotètics per a ambdues seccions. La línia discontinua indica la cota del cabal dominant. Escala no exagerada en cap eix. Font: elaboració pròpia.

Un altre factor que pot haver influït en la formació d'aquestes lleres, d'altra banda més proporcionades que les explicades amb anterioritat, és com a conseqüència de la vegetació frondosa existent (el clima és més humit) i el conseqüent augment de la resistència dels marges a l'erosió produïda per l'aigua. La magnitud del quocient B/y_m superior a $B_{1 \circ 2}/y_{m1 \circ 2}$ dóna suport a aquestes hipòtesis.

Per finalitzar amb els comentaris a la regió mitja, dels 19 aforaments amb seccions més amples i profundes que les estables, els realitzats en les capçaleres dels afluents de l'Ebre poden igualment ésser explicats per la hipòtesi anterior de la presència de basses. Un exemple és el riu Urederra (número 51) que a prop del naixement presenta seqüències catalogades de ràpids i basses.

- III. *Regió inferior:* els aforaments amb seccions més amples i poc profundes que les teòricament estables són encara més predominants amb més del 70% del total. El mateix raonament emprat en la regió mitja pot aplicar-se en aquest cas: les aigües en estiatge ocupen una àrea menys profunda que ampla (Figura 30.a), resultant en una secció força més desproporcionada que la que aboquen les equacions de Lee i Julien.

El nombre d'aforaments amb seccions més grans tant d'amplada com de calat o més estretes és mínim.

5.10 CONCLUSIÓ SOBRE LA TEORIA DEL RÈGIM

Tot i els inicis amb vocació purament pràctica, l'evolució de les metodologies per a obtenir la morfologia hidràulica fluvial avança per a poder copsar l'estat natural dels rius i ampliar el coneixement sobre l'evolució de les lleres.

Lee i Julien (2006) amb una gran base de dades i amb el rerefons d'una sòlida teoria de Julien i Wargadalam (1995) de base teòrica, són capaços de proporcionar un paquet de fórmules de senzilla aplicació que, tot i les mancances inherents al reconeixement fonamentalment pels cabals en aigües baixes, sembla prou adient el seu ús en l'estudi de les seccions en estiatge.

La secció que ocupa l'aigua en condicions d'estiatge presenta majoritàriament unes dimensions on l'amplada és desproporcionadament ampla respecte del calat mitjà. Les velocitats per la seva banda són força més petites.

La formació d'una llera específica per a les aigües baixes queda relegada en un segon terme.

6 PASSAT I FUTUR

6.1 INTRODUCCIÓ

D. Pedro Antonio va tenir el privilegi de recórrer la vall de l'Ebre l'estiu del 1863 quan la pressió antròpica sobre els rius no era tan severa. Els petits aprofitaments per a moure molins, les rescloses per a la captació d'aigua de reg o les justes captacions per al subministrament d'aigua de boca, són els exemples de l'inventari que al reconeixement se'n fa ressò.

Avui en dia el panorama ha canviat radicalment. Els grans embassaments, les centrals hidroelèctriques, les concessions pel reg, les múltiples captacions per al subministrament d'aigua potable, en definitiva, tots els canvis que necessàriament ha hagut d'introduir l'home per assegurar la seva existència amb garanties i millorar la qualitat de vida en general, han transformat molts rius i les seves riberes en ecosistemes endèmicament malalts en molts indrets. En el cas particular del riu Ebre, no només és ressaltable el canvi accelerat en el seu front deltaic originat, en gran mesura, per la retenció dels sòlids en suspensió en els embassaments com el sistema Ribarroja-Mequinensa que reté el 75% del transport en suspensió que arriba (Palanques *et al.*, 1990 citat a Dolz *et al.*, 1997). La degradació és també visible a la capçalera (Álvarez *et al.*, 2007) on, entre d'altres, paradòxicament sembla ésser que l'adequació de l'estació d'esquí a Alto Campoo incrementa la quantitat de fons en la llera reblint les basses i reduint la superfície habitable per als organismes.

6.2 ELS PERFILS LONGITUDINALS: PENDENTS I CABAL

Una de les dues làmines que s'adjunten en el document mostra el perfil longitudinal del riu Ebre i dels seus afluents. Alhora, s'especifiquen les cotes i la distància a la que es troben diversos punts

singulars del naixement del riu principal, sobretot de confluències de rius i del seu pas per poblacions, que permet el càlcul dels pendents per a cada segment.

A més, la detallada anàlisi de D. Pedro Antonio de la xarxa hidrogràfica inclou les distàncies a l'origen a les que els afluents de l'Ebre hi desemboquen o els canals de reg hi capten les aigües. D'aquesta manera, és també factible la realització del perfil longitudinal amb l'evolució del cabal que duu l'Ebre fins desembocar al Mediterrani.

6.2.1 PERFIL LONGITUDINAL

L'estudi del perfil longitudinal resta encara avui en dia sense una solució definitiva i universal. Comunament (Lee i Tsai, 2010; Knighton, 1999; i Rădoane *et al.*, 2003) quatre senzilles funcions matemàtiques es relacionen amb l'anàlisi dels pendents:

- I. Funció lineal: $H = a \cdot L + b$
- II. Funció exponencial: $H = a \cdot e^{b \cdot L}$
- III. Funció potencial: $H = a \cdot L^b$
- IV. Funció logarítmica: $H = a \cdot \ln(L) + b$

On:

H és l'elevació del punt al respecte d'una referència (e.g. respecte de la cota a la que desemboca el riu)

L és la distància del punt avaluat des de l'origen (e.g. naixement del riu)

a i b constants a calibrar per a cada cas.

Lee i Tsai (2009) i Rădoane *et al.* (2003) estudien les possibles implicacions que un perfil longitudinal d'un riu, en aquest cas el de l'Ebre, s'adapti millor a una d'aquestes quatre funcions en particular. La següent gràfica (Figura 33) mostra el perfil longitudinal a partir de la làmina adjunta en el *Reconocimiento Hidrológico del Valle del Ebro* i la corba d'ajust que presenta un millor ajust ($r^2 = 0.97$), la funció logarítmica.

Segons els autors citats, coincideixen en indicar que la funció logarítmica s'ajusta millor en rius que presenten una gradació en el material de la llera, de més groller a la regió superior a més fi a la regió inferior, patró que es produeix al riu Ebre.

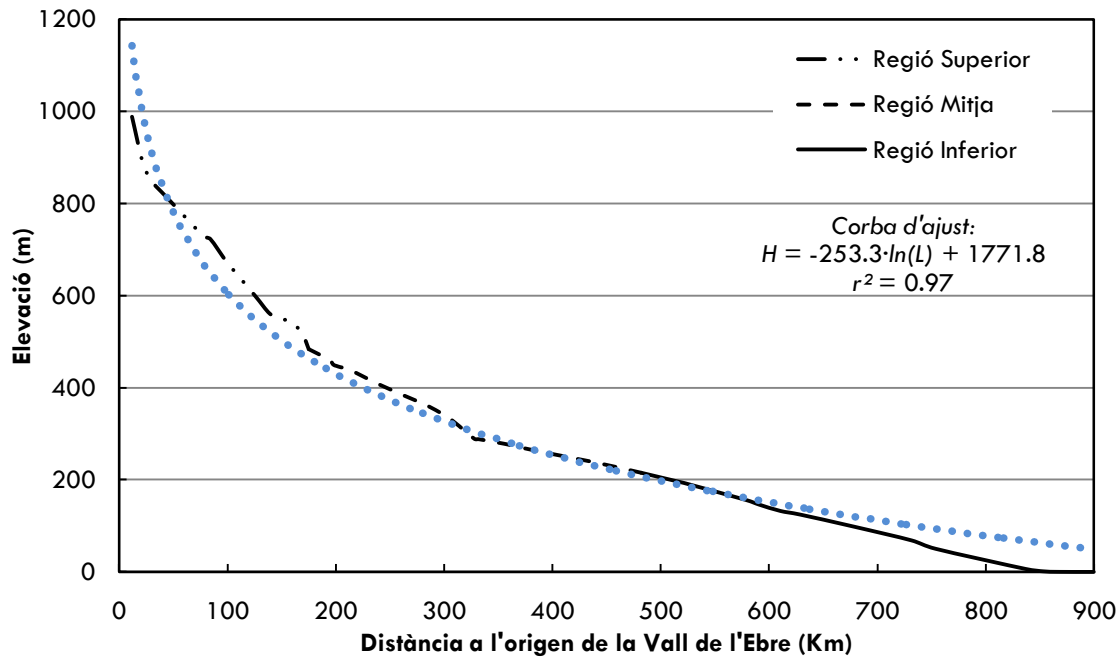


Figura 33. Perfil longitudinal del riu Ebre (en negre) dividit en regions segon D. Pedro Antonio (veure llegendes). Es coneix l'elevació i la distància a l'origen de la vall de l'Ebre de 43 punts (làmina adjunta en el Reconocimiento Hidrológico del Valle del Ebro). Es superposa corba de la funció logarítmica que millor s'adapta a les dades (en blau i puntejat). L'expressió de la corba i el coeficient de determinació r^2 es mostren a la gràfica. Font: elaboració pròpia.

6.2.2 PERFIL LONGITUDINAL DEL CABAL

Knighton (1999) analitza l'evolució del cabal en funció de la distància a l'origen i proposa una relació potencial del tipus $Q = a \cdot L^b$, tot i que l'estructura de la conca i les discontinuïtats, bàsicament introduïdes pels afluents, minven el grau de convergència. Una altra restricció per a la relació potencial és que, tant en els rius tributaris com en el riu principal estudiat, es tinguin en compte els cabals dominants.

Com que l'estudi dels cabals en el riu Ebre inclou molts tributaris (Taula 4), algunes captacions i, a més, les dades estan preses en l'estiatge de la vall, no s'intentarà ajustar l'evolució dels cabals calculats a una funció matemàtica. La gràfica (Figura 34) mostra la forma que adopta el cabal transportat pel riu Ebre en funció de la distància a l'origen de la vall.

Observant la gràfica s'observa com després d'augmentar el cabal en la regió superior fins al voltant dels $20 \text{ m}^3/\text{s}$, a la regió mitja dobra la quantitat gràcies en gran part a les incorporacions del Glera i de l'Aragón³¹. No és, però, fins a la incorporació del riu Segre a 150 Km de la desembocadura al Mediterrani, que el riu triplica la quantitat d'aigua i assoleix els $136 \text{ m}^3/\text{s}$. El riu Segre és, per tant, el tributari més important en l'estiatge de l'Ebre del 1863 i, possiblement, de la resta d'anys fins a la modificació dels règims naturals amb la construcció d'embassaments i les regulacions introduïdes, desenvolupat en el següent apartat.

³¹ Hi ha una dita popular que diu: *Ega, Arga y Aragón hacen al Ebro varón*. Segons l'estiatge de 1863, uns altres rius haurien d'ésser els citats.

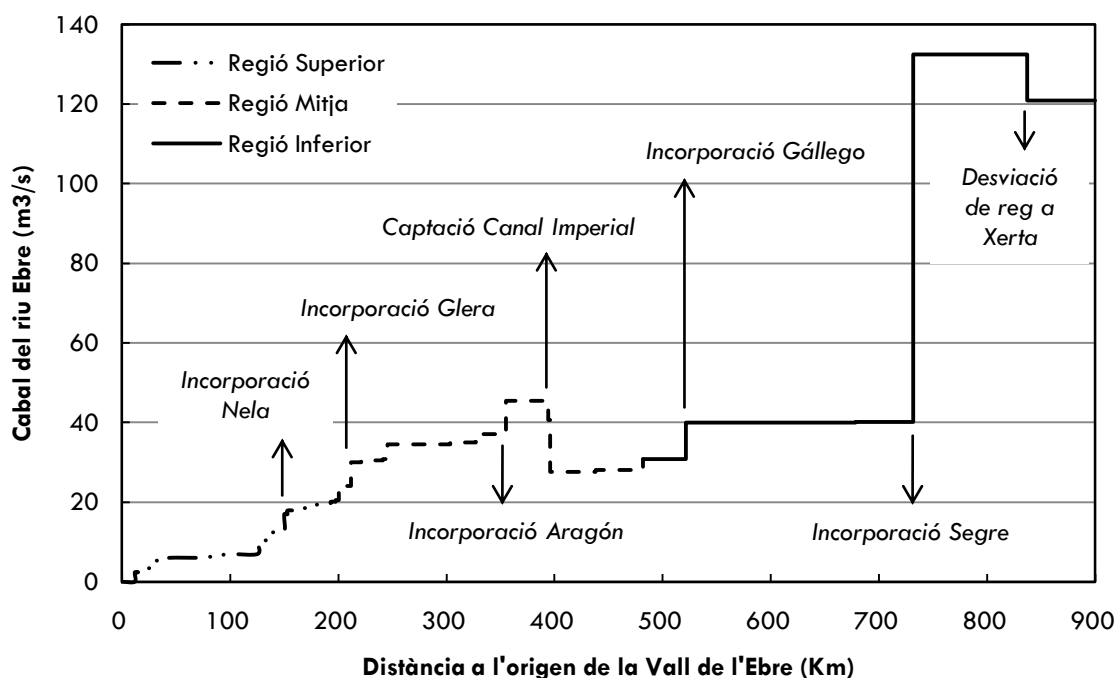


Figura 34. Perfil longitudinal de l'evolució del cabal al riu Ebre. Es marquen els 8 canvis de cabal més importants. Font: elaboració pròpia a partir de les dades de Mesa Arroquia (1963).

6.3 CABAL MÍNIM: UN PAS CAP EL RÈGIM DE CABALS DE MANTENIMENT

6.3.1 CABAL DE MANTENIMENT

En una conca on la regulació assoleix el 95 – 97% (Sánchez-Arcilla *et al.*, 1997), ha d'esdevenir una característica fonamental del model de gestió dels recursos hídrics del segle XXI avaluar els cabals tenint en consideració aspectes mediambientals i no exclusivament requeriments per a satisfer les necessitats poblacionals. En aquest sentit la Directiva Marc de l'Aigua (Directiva 2000/60/CE) constitueix un referent en el desenvolupament d'una nova normativa en matèria d'aigua (Palau, 2007) i estableix que la implementació dels cabals ecològics (una de les múltiples denominacions) ha de permetre “mantindre de forma sostenible la funcionalitat i estructura dels ecosistemes aquàtics i dels ecosistemes terrestres associats, contribuint a assolir el bon estat o potencial ecològic en rius i aigües de transició”. A Espanya la Llei 11/2005, de 22 de juny, defineix els cabals ecològics com “els que mantenen com a mínim la vida piscícola que de manera natural habitaria o pogués habitar en el riu, així com la seva vegetació de ribera”.

Les conclusions a les que el mateix Palau (2007) arriba indiquen que, en l'àmbit científic-tècnic, els cabals de manteniment han de complir amb les següents premisses:

- a) Que es fonamentin en característiques intrínseques de l'ecosistema fluvial i no en criteris antròpics.
- b) Que els resultats es refereixin a tot l'ecosistema fluvial o al màxim nombre de components.
- c) Que s'intensifiquin els esforços en les tasques de validació posterior un cop introduïda la nova proposta de cabal en el sistema.

La determinació del cabal ambiental ha d'ésser alhora acompanyat de l'especificació d'un règim de cabals regulat que s'adapti a les característiques del règim natural, i no a la implementació d'una xifra única constant. L'ecosistema ha sabut adaptar-se a les modulacions de cabal, tant a les avingudes com als estiatges, i qualsevol modificació pot causar canvis significatius (extinció d'espècies autòctones, degradació dels boscos de ribera, etc.).

A partir de la definició d'ambdós conceptes, cabal ambiental i règim de cabals regulat, es pot suposar que l'estudi de l'estiatge d'un riu encara no regulat pot servir per extreure l'ordre de magnitud dels cabals mínims circulants. És a dir, dins la modulació interanual (diària, mensual, etc.) que presenten els cabals d'un riu, els cabals en estiatge es poden interpretar com el límit inferior que cal respectar per tal de preservar l'ecosistema.

6.3.2 MÈTODE DE CÀLCUL

Palau (2007) classifica en cinc grups les metodologies pel càlcul del cabal de manteniment segons les dades de partida. La disparitat d'aproximacions en complica la determinació del més òptim i obliga a priori a tenir un coneixement exhaustiu dels objectius que es volen assolir.

- I. *Enfocament hidrològic*: basat en dades hidrològiques (cabals classificats, anàlisi de sèries temporals, etc.).
- II. *Enfocament hidràulic*: relaciona diversos paràmetres de la geometria hidràulica d'una llera amb el cabal. El més comú és observar la variació del perímetre mullat.
- III. *Enfocament hidrobiològic*: es quantifica l'hàbitat físic d'una espècie de referència i s'analitza la seva relació amb el cabal mitjançant la simulació hidràulica.
- IV. *Enfocament holístic*: procediment per a deduir el cabal de manteniment a partir d'una anàlisi independent de les necessitats dels components de l'ecosistema fluvial objectiu.
- V. *Enfocament ecohidrològic*: basat en dades hidrològiques però adoptant com a referent els requeriments de les espècies objectiu per a les quals el cabal mínim establert permeti la seva conservació.

Les dades extretes del reconeixement permeten l'aplicació exclusivament de mètodes hidràulics. Tal i com s'explica a l'apartat 1.2, l'objectiu de D. Pedro Antonio no és la determinació de la diversitat biòtica ni de la seva qualitat, fet reflectit en la brevetat i la superficialitat de les descripcions del medi natural trobades al text, impossibilitant l'aplicació de mètodes que contemplin l'ús d'indicadors biològics. En una de les comptades referències botàniques, per exemple, D. Pedro Antonio descriu el curs del riu Inglares (a Euskadi) amb marges "pobladas de

Carrascas (alzines petites) y (sic) Quegigos (semblant als roures), estando por lo tanto (sic) incultas” que seria interessant comprovar-ne el seu estat actual.

Amb tot, el mètode del perímetre mullat desenvolupat a continuació es considera el més apte donades les característiques del present estudi.

6.3.3 DEL CABAL DE MANTENIMENT AL CABAL MÍNIM: MÈTODE DEL PERÍMETRE MULLAT

Gippel i Stewardson (1997) estudien l'evolució del perímetre mullat amb el cabal però com a eina d'obtenció dels cabals mínims, dins d'un procés global que ha de servir per fixar un autèntic règim de cabals regulat. Aquesta estratègia no està en contradicció amb les recomanacions de Palau (2007): restringir la utilització dels mètodes hidràulics, com el del perímetre mullat, per a la validació de les mesures adoptades i excloure el seu ús en la definició de cabals.

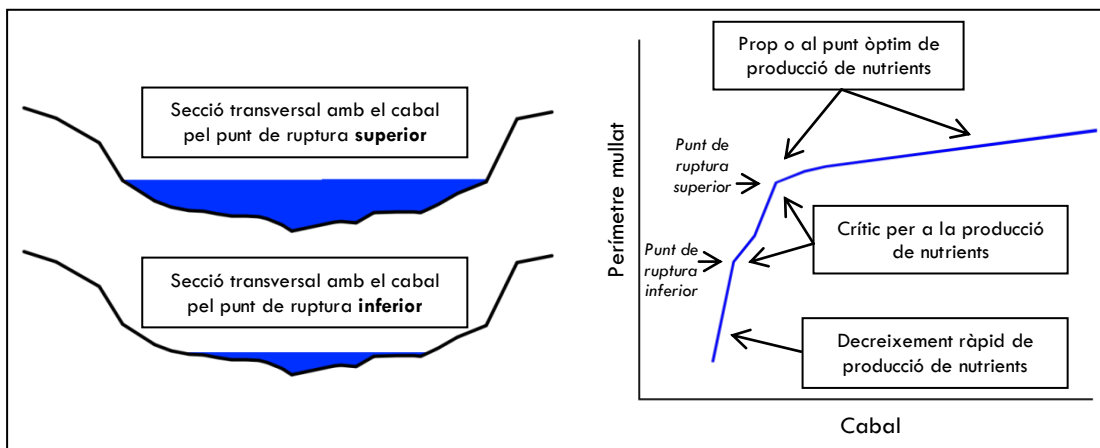


Figura 35. Representació gràfica del mètode. Esquerra: secció transversal tipus amb 2 punts de ruptura. Dreta: corba Q-P amb zones destacades. No pertany a cap aforament de la vall de l'Ebre. Font: redibuixat de Leathe i Nelson (1986).

El mètode del perímetre mullat és un dels més senzills que actualment s'utilitzen. Els fonaments radiquen en la hipòtesis que la producció de nutrients en època d'estiatge pot ésser un dels factors que més influènciï la capacitat de càrrega biòtica del riu. Conegut que l'aliment principal de molts peixos són els invertebrats aquàtics principalment produïts en els ràpids, el mètode assumeix que l'hàbitat per a peixos està relacionat amb la producció de nutrients relacionada alhora amb el perímetre mullat als ràpids dels rius (Annear i Conder, 1984). En definitiva, el perímetre mullat és emprat com a mesura de la disponibilitat d'hàbitat aquàtic sobre un rang de cabals.

Si es representa gràficament la relació del perímetre mullat amb el cabal, generalment la corba resultant presenta una forma característica: un pendent molt pronunciat per a cabals petits que disminueix a mesura que el cabal augmenta. Al principi, el perímetre mullat creix bruscament però un cop el calat de l'aigua s'aixeca per sobre del fon el ritme de creixement decreix

abruptament (Parker, Armstrong i Richards, 2004). Aquest canvi en el pendent de la corba cabal-perímetre mullat és usat per a determinar el cabal necessari per a la protecció de l'hàbitat.

6.3.4 LIMITACIONS A LA IMPLEMENTACIÓ DEL MÈTODE A LES DADES DEL RECONeixEMENT

El handicap més rellevant prové de disposar del dibuix de la secció mullada exclusivament i no d'una representació global de la secció transversal que inclogui els marges. Gràficament s'interpreta observant la Figura 35: pot succeir que en alguns casos es disposi d'una secció mullada tipus com de la llera inferior, perdent tota la informació que pugui aportar un nivell d'aigua superior. Aquesta circumstància es pot traduir a una dependència de la severitat de l'estiatge a la que es sotmeten els aforaments i que a les corbes no apareguin punts de ruptura significatius:

- a) Durant l'estiatge d'un any humit podria circular un cabal suficient per a omplir la llera fins a mullar almenys tot el fons. Els aforaments mostrarien aleshores unes seccions transversals les seccions mullades dels quals presentarien unes formes no gaire diferents de les que ocuparien el cabal dominant.
- b) Durant l'estiatge d'un any sec podria circular tan poca aigua que la secció mullada podria no ser representativa de la morfologia hidràulica general de l'aforament.

Les anotacions de D. Pedro Antonio fan suposar que l'estiatge de 1863 presenta unes propietats més semblants a les primer grup³².

De l'anàlisi de Parker, Armstrong i Richards (2004) sobre l'aplicabilitat del mètode del perímetre mullat es desprèn que hauria d'ésser emprat exclusivament en les seccions transversals corresponents a ràpids i no en basses ni *runs*³³, fet que xoca amb la localització incerta dels aforaments a la vall. A més a més, els rius al·luvials que poden ajustar lliurement l'amplada i la profunditat són també els més adients.

Per aplicar-ho en condicions òptimes cal que sigui implementat en seccions transversals de geometries rectangulars o trapeziformes de trams rectes, ja que proporcionen un punt de ruptura (un canvi brusc en la inclinació de la corba cabal-perímetre mullat) més fàcil de definir. A la pràctica no acostuma a haver-hi un únic punt de ruptura i la presència de barres o qualsevol altra irregularitat dificulta encara més la seva identificació.

Per eradicar la subjectivitat a l'hora de determinar el punt de ruptura, Gippel i Stewardson (1998) proposen dos mètodes científics. Ambdós es basen en el fet que les corbes poden ésser ajustades amb una equació potencial o logarítmica segons el cas i que, aleshores, el punt de

³² En la memòria del reconeixement, D. Pedro Antonio fa referència a un (sic) *estiage medio*, i no de los (sic) *mas estériles* que se conocen en este río (De Mesa Arroquia, 1863).

³³ Run o corrent, és la llera monòtona amb un talveg ben definit. La llera és plana i cóncava lateralment (Parasiewicz et al., 2009).

ruptura pot ésser matemàticament determinat calculant el punt de màxima curvatura o el punt on el pendent és igual a 1 (o un altre valor prefixat segons l'objectiu³⁴). Una altra estratègia és la citada per Parker, Armstrong i Richards (2004) que proposen l'ús de la corba de suport perímetre mullat-calat per a incrementar la robustesa del mètode: la coincidència o proximitat dels punts de ruptura en ambdues corbes és emprada per a determinar el cabal objectiu a més a més d'altres aproximacions en el cas de disposar de la morfologia de les riberes.

6.3.5 INFORMACIÓ COMPLEMENTÀRIA

Gràcies al treball de Sánchez i Ibáñez (2007) per a l'Agència Catalana de l'Aigua, s'han determinat els cabals ambientals per al tram inferior de l'Ebre seguint el mètode de l'*Aproximació del Rang de Variabilitat (RVA)*. El mètode identifica el rang dels cabals objectiu com a percentils determinats (en el cas de l'Ebre s'utilitza el criteri de rang del percentil 10) per a cadascun dels indicadors estadístics que anomena IHA (*Index of Hydrologic Alteration*). Una meitat dels IHA mesuren la tendència central de la magnitud o el ritme del canvi dels cabals i l'altra la magnitud, la durada, la freqüència i la localització temporal d'esdeveniments extrems (sequeres i grans avingudes) (Parker, Armstrong i Richards, 2004). En síntesis, l'RVA es fonamenta en dos principis bàsics (Richter, 2008):

- I. Protegir la variabilitat dels cabals naturals pot ésser la millor estratègia per a conservar l'ecosistema fluvial.
- II. La definició d'un règim de cabals ha d'estar realitzada des d'un punt de vista *adaptatiu*.

Parker, Armstrong i Richards (2004) recomanen l'ús d'aquesta tècnica en rius no regulats, per a poder documentar la variabilitat natural en els cabals. La sèrie de cabals emprada pels autors de l'estudi a l'Ebre comprèn el període entre 1940 i 1985, que malgrat ésser als anys 40 quan es va iniciar la construcció dels grans embassaments a la conca s'han emprat altres tècniques per a determinar quin hauria estat el règim natural (Sánchez i Ibáñez, 2008).

La proposta dels cabals ambientals de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) es resumeix amb els cabals mensuals per a tres anys hidrològics diferents: mitjos, secs i humits.

Sánchez i Ibáñez (2007), a més a més, en un estudi per a l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA) presenten l'anàlisi dels cabals ambientals i els cabals en condicions de sequera per a la conca de l'Ebre realitzada per la *Fundación Nueva Cultura del Agua (FNCA)*. Seguint els mateixos criteris que els adoptats en el tram inferior de l'Ebre, en el document es proposa el règim de cabals ambientals i en sequera per a 13 localitzacions diferents. Casualment, 11 de les propostes es realitzen per a punts propers a aforaments de D. Pedro Antonio, en concret les pertanyents a l'Aragón, l'Arga, l'Ega, el Gállego, l'Irati, l'Isábena, el

³⁴ Per exemple, si l'hàbitat presenta unes particularitats mediambientals úniques (fauna, flora, etc.) i l'aigua no és un recurs escàs, un pendent inferior a 1 seria més apropiat (Gippel i Stewardson, 1998).

Jalón, el Noguera Pallaresa, el Noguera Ribagorçana, el Segre, i una nova proposta per a l'Ebre a Mendavia (a la regió mitja).

En síntesi, es disposen de 12 propostes de règims de cabals ambientals i de cabals en condicions de sequera que permeten la comparació directa de les magnituds durant l'estiatge amb les dades del reconeixement de D. Pedro Antonio.

Interpretant els cabals en condicions de sequera -proposats actualment per investigadors seguint la metodologia de l'RVA- com els límits inferiors de les magnituds dels cabals que han de transportar els rius, es considera adient comparar-los amb els cabals mínims obtinguts a partir dels aforaments del 1863 i emprant el mètode del perímetre mullat. Nogensmenys, s'analitzaran qualitativament els cabals ambientals igualment proposats.

6.3.6 PROCEDIMENT

Per a la implementació del mètode del perímetre mullat, totes les seccions disponibles són, a priori, considerades vàlides per la desconexió que es té de la unitat hidromorfològica a la que pertanyen. Tot i així, es focalitza l'interès en els aforaments propers a les localitzacions de les noves propostes de règims de cabals en sequera, dels que es presenta alhora la gràfica perímetre mullat-calat corresponent.

L'eina de simulació hidràulica HEC-RAS s'utilitza pel càlcul dels diferents nivells d'aigua en règim uniforme que alhora proporcionaran l'evolució del perímetre mullat i del calat segons el cabal introduït.

Per a facilitar la comparació entre els diferents aforaments, les figures presenten els eixos normalitzats; és a dir, adimensionals i regulats entre 0 i 1. Cada secció és avaluada per 100 cabals, essent el màxim el corresponent a la secció plena. Així doncs, els eixos presenten la forma $Q/Q_{màx}$, $P/P_{màx}$ i $y/y_{màx}$ essent $Q_{màx}$, $P_{màx}$ i $y_{màx}$ els valors corresponents a la secció dibuixada per D. Pedro Antonio.

Com a conseqüència de la pròpia naturalesa de les dades d'origen, la determinació del punt de ruptura es realitza visualment, sense càlculs complementaris.

6.3.7 RESULTATS

Les corbes d'ambdues gràfiques Q-P i P-y presenten múltiples punts de ruptura en diversos casos tot i la limitació a la secció d'estiatge aforada per D. Pedro Antonio. Essent els valors d'aquest estiatge els màxims avaluats, els punt de ruptura o zones que determinen els cabals mínims s'escullen com aquells que proporcionen els majors cabals, tenint en compte el repunt ben definit en la corba P-y. Tot i així també sorgeixen complicacions:

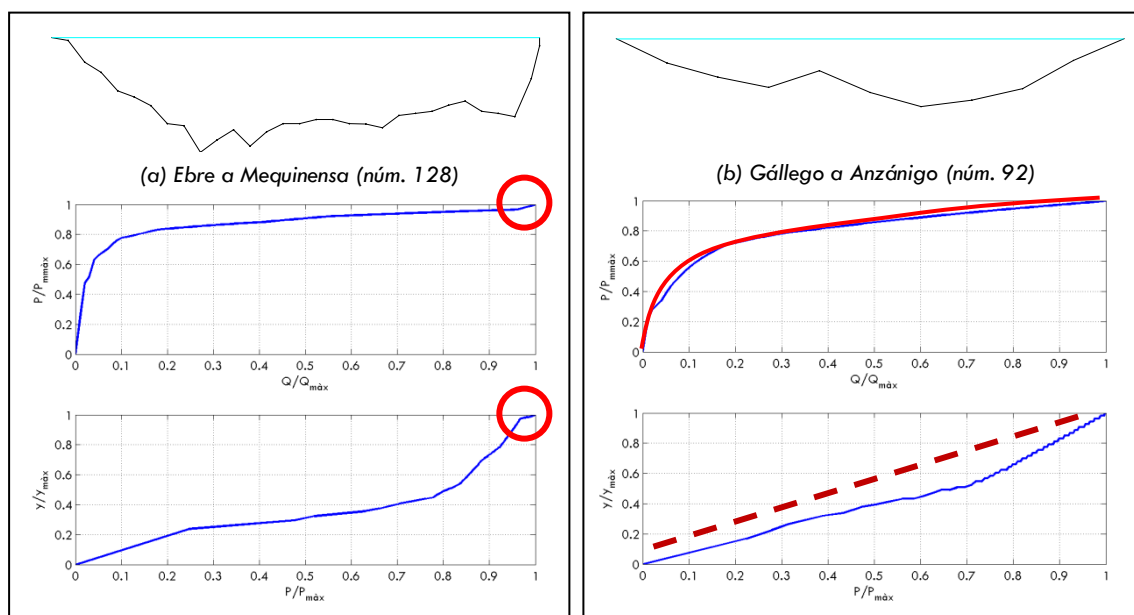


Figura 36. Corbes Q-P i P-y de les seccions de l'Ebre a Mequinensa i del Gállego a Anzánigo. Presenten característiques que compliquen la determinació del Q_{\min} (en vermell). Eix vertical dels perfils transversals exagerat en un factor 10. Font: elaboració pròpia.

- I. Les corbes presenten un canvi sobtat en el pendent contrari a l'esperat. Pot indicar la presència d'un punt de ruptura que la limitació de la secció mullada dibuixada no és capaç de copsar. La secció de l'Ebre a Mequinensa presenta aquest comportament (Figura 36.a).
- II. No sempre és possible una fàcil identificació dels punts de ruptura per la suavitat del canvi de pendent. La secció del Gállego a Anzánigo n'és un exemple (Figura 36.b).

Taula 25. Cabals mínims (Q_{\min}) calculats amb el mètode del perímetre mullat a partir de les dades del reconeixement (Q_{1863}) i magnituds dels cabals en sequera proposats per Sánchez i Ibáñez (2007) (Q_{sequera}). El repunt a les gràfiques de y/y_{\max} - P/P_{\max} és determinant. S'inclou el percentatge del Q_{\min} respecte del Q_{1863} . Font: elaboració pròpia a partir de les dades de Mesa Arroquia (1865) i Sánchez i Ibáñez (2008).

Número	Riu	y_{1863} (m)	P_{1863} (m)	Q_{1863} (m ³ /s)	Q_{\min} (m ³ /s)	%	Q_{sequera} (m ³ /s) (a)	
							Q_{Agost}	Q_{Setembre}
47	Ebre	1.2	87.0	30.2	21.1	69.9	15.5	13.8
50	Ega	0.4	12.3	2.0	1.4	70.0	1.6	1.4
56	Aragón	0.5	37.2	4.4	3.5	79.5	3.7	2.9
58	Arga	0.3	21.5	3.3	3.0	90.9	4.5	4.1
79	Irati	0.8	25.8	4.1	3.7	90.2	1.0	1.4
88	Jalón	1.2	14.3	8.7	7.0	80.4	1.2	1.2
92	Gállego	0.5	39.9	10.6	7.4	69.8	2.7	2.7
103	Segre	0.8	35.8	20.9	14.6	69.9	7.6	6.9
105	Noguera Pallaresa	1.1	40.3	29.0	23.2	80.0	6.6	6.1
112	Noguera Ribagorçana	0.8	49.2	24.5	14.7	60.0	4.6	2.1
121	Isábena	0.5	14.5	5.0	2.5	50.0	1.0	0.7

129	Ebre (b)	3.6	85.0	136.0	108.8	80.0	116.2	102.7
------------	----------	-----	------	-------	-------	------	-------	-------

(a) Per a fer la comparació s'inclouen els cabals dels mesos d'agost i setembre ja que el 21 de juliol D. Pedro Antonio es trobava a Miranda de Ebro i, per tant, és lògic que arribés a Calahorra (núm. 47) a finals de juliol o a principis d'agost.

(b) Els cabals són els corresponents a l'any hidrològic considerat sec.

En general es poden identificar els següents comportaments:

- I. Al voltant del 10% del cabal màxim considerat, la corba Q-P canvia bruscament el pendent disminuint-lo. És un primer punt o zona de ruptura.
- II. Entre el 30 i el 60% del cabal màxim hi ha un altre punt de ruptura a partir del qual la corba és força horitzontal.
- III. En diversos casos el canvi de pendent en la corba Q-P és molt suau i resulta difícil discernir un únic punt de ruptura.
- IV. La corba P-y repunta cap el 90% del perímetre mullat màxim.
- V. En general, és força difícil determinar un únic cabal mínim i sembla més encertat definir un interval. L'horitzontalitat de la corba Q-P n'és el motiu principal.

Recuperant els resultats del capítol anterior (apartat 5.9.14 *Anàlisi de les seccions de la conca en l'estiatge*) no sembla haver cap relació entre les formes les corbes Q-P i P-y amb la geometria de les seccions transversals. És a dir, no hi ha cap patró que indiqui uns comportaments similars de les corbes per a configuracions de les seccions reals d'un mateix tipus (Taula 24). És ressaltable, però, que la configuració predominant (seccions reals més amples i poc profundes que les predites) és la que presenta uns perímetres mullats relativament majors, essent aquesta condició més favorable per a la biòtica dels rius.

A la Taula 25 es resumeixen els resultats obtinguts en els aforaments de D. Pedro Antonio propers a la zona on actualment s'han definit els nous règims de cabals en sequera. Per fer-ho més aclaridor, es mostren les corbes de l'Ebre a Calahorra (núm. 47) i a Flix (núm. 129), del Jalón a Calatayud (núm. 88) i del Segre a abans d'arribar a Organyà (núm. 103) acompanyades de les seccions (Figura 37). El tret característic comú d'aquestes figures és el repunt ben definit en la corba P-y que s'interpreta com el límit per a definir el cabal mínim.

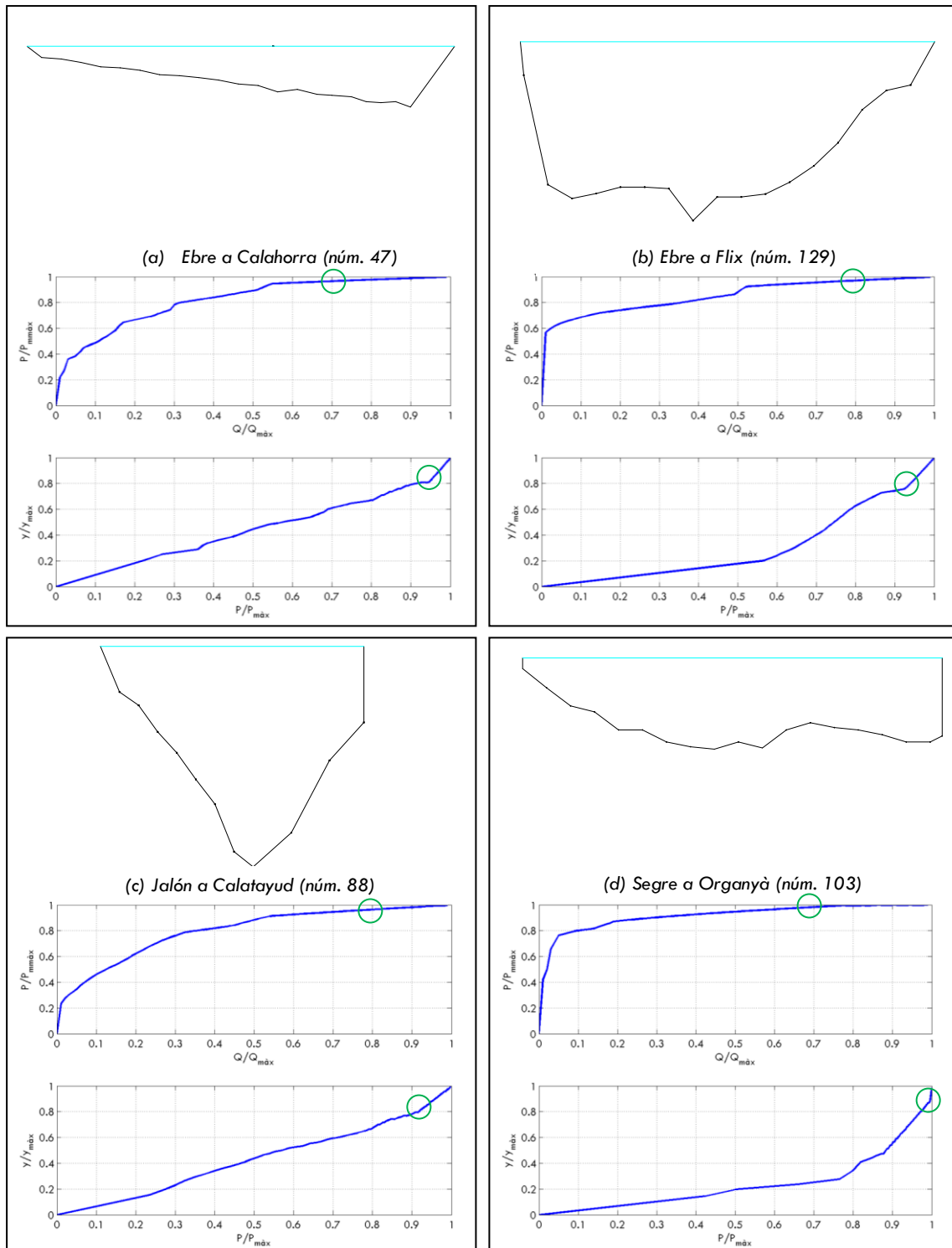


Figura 37. Corbes Q-P i P-y normalitzades per a l'Ebre a Calahorra i a Flix, el Segre a Organyà i el Jalón a Calatayud. La multiplicitat de punts de ruptura, la suavitat en el canvi de pendent o l'horitzontalitat de la corba dificulten la determinació del Q_{min} . El cercle verd indica els punts escollits per a determinar-lo. Eix vertical dels perfils transversals exagerat en un factor 10. Font: elaboració pròpia.

6.3.8 DISCUSSIÓ

L'estudi de les corbes Q-P i P-y sembla mostrar que, majoritàriament, l'alçada de la làmina d'aigua és suficient per a sobrepassar la zona crítica (llera inferior de la Figura 35) i, per tant,

recolza la hipòtesis de poder obtindre un cabal mínim vàlid o si més no un ordre de magnitud. No obstant es recorda el requeriment no factible en aquest treball de disposar d'aforaments realitzats en ràpids de trams on la llera del riu segueixi un recorregut rectilini.

Tot i que majoritàriament les corbes fan un canvi brusc al voltant del 10% del Q_{1863} , els cabals que en resulten són extremadament petits i no es consideren vàlids com a cabals mínims, ni en condicions de sequera. La hipòtesi és que la manca de la geometria de les riberes en el dibuix de les seccions és la responsable desvirtuant els resultats, ja que atorga a aquest primer punt de ruptura una rellevància que d'altra manera no li correspondria.

A l'observar les magnituds dels cabals durant l'estiatge de 1863 queda palès que, en general, hi circula força més aigua que en la proposta de règim de cabals actuals en condicions de sequera (mesos d'agost i setembre). En canvi, al calcular els Q_{min} pel mètode del perímetre mullat, els resultats són diferents: força similars per a una meitat i relativament molt elevats per a l'altra. Exemples d'una bona correlació són l'Ebre en el seu tram final o l'Aragón a Yesa. Contràriament, el cabal proposat a la Noguera Ribagorçana és quasi 5 vegades inferior al mínim obtingut pel mètode del perímetre mullat exposat.

Així doncs, tot i semblar que l'ús del mètode del perímetre mullat és més exigent i proporciona cabals més grans, cal tenir en compte que el mètode emprat per a determinar els règims de cabals (el mètode hidrològic RVA) contempla sèries hidrològiques que inclouen grans seques com la que va ocórrer durant la dècada dels 50 del segle XX. Aquest fet pot haver col·laborat a l'hora de disminuir uns cabals en sequera fins a nivells tan baixos. A més a més, a l'hora de definir el cabal mínim a partir la corba $Q-P$ es poden haver comès errors intrínsecs a la subjectivitat del mètode.

Des d'una altra perspectiva, coneixedors de la petitesa dels cabals i de les seccions avaluades com a conseqüència de les condicions d'estiatge, l'últim part força horitzontal que s'observa en múltiples corbes $Q-P$ dels aforaments es pot interpretar com que els cabals que hi circulen ja són per se els cabals ambientals. Amb aquest supòsit, la comparació amb el règim de cabals ambientals proposat ofereix una concordança curiosa: el cabal ambiental per al tram inferior de l'Ebre al setembre és de $136 \text{ m}^3/\text{s}$ (any hidrològic mig), xifra que coincideix amb els $135 \text{ m}^3/\text{s}$ que D. Pedro Antonio va aforar a Flix per sota de tots els seus afluents. En la resta de casos, els cabals ambientals proposats són majoritàriament inferiors als aforats durant l'estiatge de 1863.

6.4 CONCLUSIÓ SOBRE ELS CABALS MÍNIMS

El mètode del perímetre mullat requereix de dades exclusivament geomètriques que cal haver obtingut amb criteri: la secció transversal en un tram de ràpids i que la llera segueixi un recorregut rectilini.

El seu ús per a la definició dels cabals mínims ha resultat ésser una estratègia força exigent. Els cabals que s'obtenen són superiors als proposats actualment emprant el mètode RVA (Sánchez i Ibáñez, 2007).

El mètode, però, presenta petites complicacions a l'hora de determinar el punt de ruptura que defineix el cabal mínim. S'han proposat millores no implementades en el present treball que caldria comprovar. S'ha tingut en compte que el coneixement d'altres mètodes més eficients per a determinar els cabals ambientals recomanen l'ús de les corbes Q-P únicament per a la validació de cabals prèviament calculats (Palau, 2007).

En el context sociopolític actual que busca establir un règim de cabals ambientals adient per a la vall, sense especulacions ni interessos generats, el cabal ambiental proposat per al tram inferior de l'Ebre és el mateix que l'aforat per D. Pedro Antonio i és proper al que s'obté a partir del perímetre mullat. En aquest sentit, l'obtenció de seccions transversals actuals per a implementar el mètode es podria desaconsellar per a ésser avui en dia una conca amb un alt grau de regulació. Caldria estudiar prèviament si en aquell tram s'han pogut produir alteracions en els perfils transversals.

6.5 LA SITUACIÓ ACTUAL: BREU ESTUDI COMPARATIU

D'ençà la construcció d'embassaments i la desviació d'aigua per a altres usos s'estan produint canvis significatius en la morfologia fluvial de la vall de l'Ebre.

Molts estudis actuals (e.g. Franquet Bernis, 2009 i Dolz et. al, 1997) focalitzen els esforços en cridar l'atenció sobre el retrocés (o la manca d'aportació de nou sediment per part del riu) que està patint el Delta de l'Ebre, un punt ben reconeixible que facilita la conscienciació de la població sobre l'aprofitament actual dels recursos hídrics.

Els canvis que s'han produït a la conca són múltiples i de diversa naturalesa, però amb un mateix denominador, la pressió antròpica.

La dificultat a l'hora de disposar de seccions transversals actuals en localitzacions idèntiques a les del reconeixement limita la tasca de comparació tal i com s'ha exposat a l'apartat 4.6. No obstant, es disposa de perfils transversals a l'Arga, l'Aragón i al Gállego, tres afluents importants de l'Ebre (Taula 4).

És important destacar que les campanyes d'aforaments realitzades avui en dia tenen un alt nivell de provabilitat que es trobin afectades per les alteracions a les que s'ha sotmès la conca i, per tant, que no siguin tan representatives del riu com ho podrien ésser les disponibles a partir de reconeixements com el de D. Pedro Antonio, on queda representat el riu en el seu estat natural. Es recorda l'exemple del que succeeix a l'alt Ebre: l'acondicionament de les pistes d'esquí a l'Alto Campoo provoca, suposadament, que les múltiples basses existents en aquesta

regió superior quedin reblertes per l'increment de l'erosió en el sistema (Álvarez *et al.*, 2007). En aquest sentit, els tres rius l'Arga, l'Aragón i el Gállego es troben sotmesos a regulacions imposades pels embassaments a les seves conques. L'Aragón des de finals de la dècada dels 50 del segle XX i el Gállego a principis de la mateixa dècada són els més intervinguts. A l'Arga només s'ha construït una presa l'any 1971.

6.5.1 PROCEDIMENT

La comparació entre perfils transversals del reconeixement de 1863 amb els de campanyes actuals s'ha realitzat a partir dels resultats obtinguts de models HEC-RAS. Introduint els cabals en estiatge aforats per D. Pedro Antonio a les modelitzacions actuals de diferents trams, es poden observar les característiques de les seccions mullades i comparar-les amb els dibuixos del document.

Els models HEC-RAS del riu Aragón a Caparroso i del Gállego a prop de la seva desembocadura han estat realitzats pel personal investigador del grup de recerca del Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental (DEHMA) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). La modelització de la confluència de l'Arga amb l'Aragón s'ha realitzat a partir de diversos perfils transversals i de les imatges aèries de la zona.

Del conjunt de valors extrets del software HEC-RAS s'han calculat les mitjanes dels paràmetres de la geometria hidràulica considerats més representatius: calat mitjà i màxima profunditat, amplada de la superfície lliure, secció mullada, velocitat mitjana i coeficient de Manning.

Finalment, s'han seleccionat els aforaments del reconeixement de D. Pedro Antonio que per la seva localització (si més no aproximada) estan inclosos dins els trams modelitzats.

6.5.2 RESULTATS

Els resultats es presenten resumits en la següent taula (Taula 26) acompanyats de les imatges zenitals amb la localització aproximada del seu emplaçament (Figura 38).

*Taula 26. Resultats comparatius entre la geometria hidràulica dels perfils transversals del reconeixement de 1863 i els actuals. Act. Indica valors actuals. En **negreta** els màxims per a cada variable. El número que acompanya la situació indica la fotografia aèria de la zona a la Figura 38. Font: elaboració pròpia.*

Situació	Aragón				Arga		Gállego			
	abans de la confluència amb l'Arga, a prop de Caparroso (1)		a la de la desembocadura a l'Ebre (2)		a la confluència amb l'Aragó (3)		a prop de la desembocadura a l'Ebre (4)		a prop de Zuera (5)	
	55	Act.	54	Act.	58	Act.	94	Act.	93	Act.
Q (m ³ /s)	4.98		8.48		3.30		9.09		17.71	
B (m)	48.6	28.1	75.0	30.6	21.5	28.0	38.0	31.4	40.8	40.0
y _m (m)	0.3	0.5	0.3	0.6	0.2	0.3	0.5	0.4	0.4	0.6

y (m)	0.4	0.9	0.4	1.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.8	0.9
A (m²)	12.0	13.5	18.9	18.2	4.1	7.0	19.7	12.4	17.5	21.9
P (m)	48.7	28.3	74.8	30.8	21.5	28.1	38.2	31.5	40.8	40.3
v_m (m/s)	0.4	0.5	0.5	0.8	0.8	0.7	0.5	1.0	1.0	1.0

6.5.3 DISCUSSIÓ

Aplicant l'analogia de la balança de Lane³⁵, hom podria predir que el que ha succeït amb el pas del temps d'ençà 1863, és la incisió de les lleres per la disminució del cabal sòlid degut a la retenció de sediments que es produeix en els embassaments.

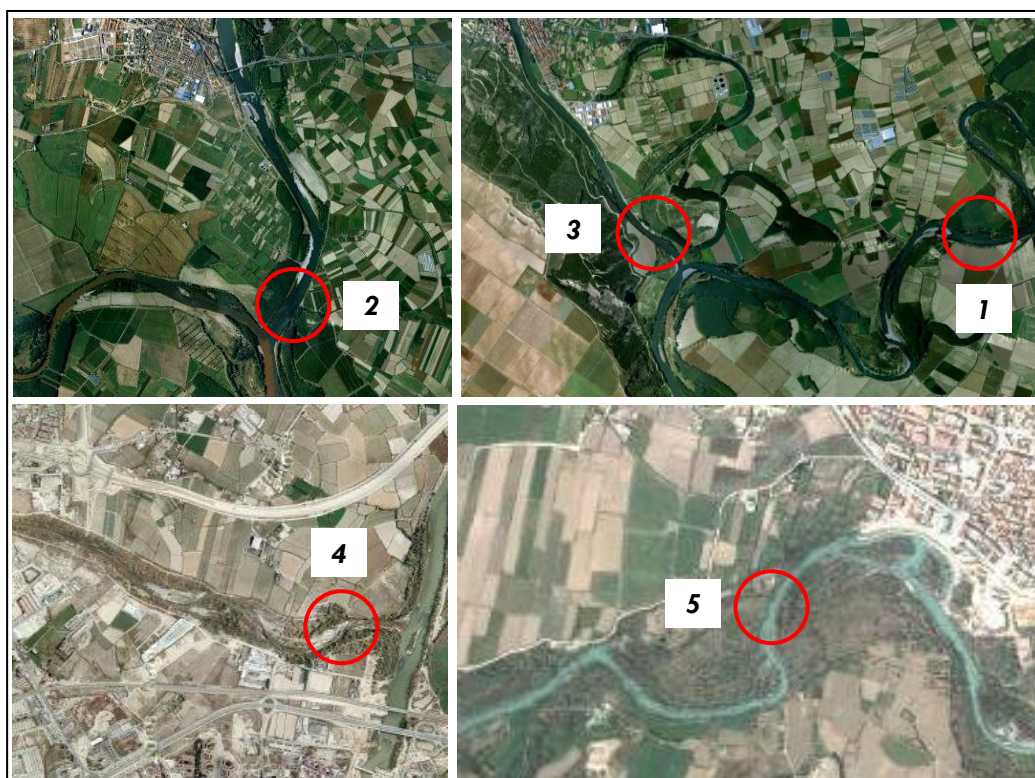


Figura 38. Emplaçament aproximat de les seccions transversals comparades. Font: elaboració pròpia a partir d'imatges de Google Maps.

L'observació de la taula amb els resultats resumits deixa entreveure que efectivament s'ha produït un estrenyiment alhora que una incisió de la llera al Gállego a Zuera i, especialment, a l'Aragón. En el cas de l'Arga es produeix el contrari, tot i que l'endegament que s'ha realitzat aigües amunt de la confluència pot haver influenciat i, a més a més, és la conca que menys s'ha vist afectada per la pressió antròpica. El Gállego en la seva desembocadura a l'Ebre sembla presentar uns paràmetres molt similars en ambdues èpoques, tot i que analitzant els pendents, l'obtingut per D. Pedro Antonio és de 0.0019, força inferior al que defineix actualment el tàlveg en els últims 2.5 km i que és de 0.0032. Aquesta diferència pot ésser deguda a errors de mesura tot i que també pot estar amplificada per l'erosió general de la llera.

³⁵ La balança de Lane és una analogia per analitzar l'equilibri del fons amb un propòsit qualitatiu a partir de quatre variables: cabal líquid, cabal sòlid, pendent del fons i mida del sediment.

És remarcable que per a un mateix cabal, el model actual de l'Aragón tant a la desembocadura a l'Ebre com a prop de Caparroso aboca uns perfils transversals gairebé un 50% més estrets i el doble de profunds mentre manté l'àrea del flux.

Recordant d'anteriors apartats el concepte del perímetre mullat com a paràmetre relacionat amb la capacitat de la llera per a mantenir una bona qualitat biòtica, la seva magnitud decreix considerablement a l'Aragón mentre que en la resta de casos es manté gairebé igual. Aquesta dada reflecteix el fet que quan la llera incideix reduint l'amplada però incrementant el calat, és provable que el perímetre mullat disminueix i, alhora, ho faci en detriment de la flora i fauna. Els efectes negatius de la incisió d'una llera produïda per la retenció de sediments aigües amunt, poden ésser també entesos com (Martín Vide, 2002): pèrdua de la inundació de les planures, descens del nivell freàtic, pèrdua del ecosistema riberenc i fragilització de les vores de la llera.

Extrapolant els resultats a la resta de la vall, caldria comprovar si aquest patró observat es repeteix en les seccions transversals de l'Ebre, sobretot en el seu tram inferior, aigües avall dels embassaments de Mequinensa i Flix. La hipòtesis és que la incisió s'hauria de repetir.

6.6 CONCLUSIONS A L'ESTUDI COMPARATIU

La transformació del territori d'ençà 1863 fins a l'actualitat ha suposat l'afectació del domini dels rius. En el cas particular de les lleres, la comparació entre cinc aforaments del reconeixement de D. Pedro Antonio i actuals deixa entreveure una possible incisió de la llera que, fent ús de l'analogia de la balança de Lane, pot succeir en rius regulats per la presència d'embassaments que minven dràsticament el transport de sediment.

La configuració actual de les lleres del riu Aragón es correspon amb el d'un perfil transversal més estret però més profund. La resta de casos estudiats no presenten un canvi tan evident, essent les actuacions a la llera (Gállego i Arga) o la no regulació tan severa del riu (Arga) les possibles explicacions.

La incisió de les lleres provoca la reducció del perímetre mullat que alhora, segons l'observat en anteriors apartats, col·labora en detriment de la qualitat biòtica dels rius.

7 CONCLUSIONS FINALS

1. S'ha destacat la importància de realitzar aforaments periòdics a punts representatius de les conques fluvials i controlar l'estat de les lleres i de les riberes, uns recursos que ajuden a comprendre el funcionament real dels rius.
2. És necessari seguir desenvolupant *teories del règim* més complertes i indagar en els fonaments teòrics que les sustenten. Aconseguir desenvolupar una teoria universal vàlida és improbable, doncs el riu i el medi que l'envolta presenten particularitats úniques en cada punt.
3. La geometria hidràulica dels rius de la vall de l'Ebre, aforats durant el seu estiatge, difereix respecte de l'esperada; els perfils transversals esdevenen, relativament, molt amples i poc profunds.
4. Lee i Julien (2006) i Altunin (1962) aporten en els seus estudis les formulacions que millor representen les mesures de l'estiatge a la vall de l'Ebre, tot i les diferències conceptuals existents entre ambdues teories. És recomanable desenvolupar el concepte del coeficient de forma K d'Altunin, el valor del qual pot resultar determinant a l'hora de predir correctament les variables.
5. L'amplada de les lleres és la variable millor predita per les teories avaluades. Es comprova que és proporcional a l'arrel quadrada del cabal.
6. L'estiatge dels rius és un concepte poc estudiat. Malgrat que els cabals dominants o formatius són els més importants en l'acció modeladora de la llera, les aigües baixes tenen una durada molt superior i els seus efectes sobre la biòtica poden ésser determinants. La

presència de lleres de dimensions específiques reduïdes per als cabals en estiatge no ha pogut ésser demostrada amb la base de dades del reconeixement del 1863.

7. L'ús de mètodes hidràulics per assessorar l'establiment de cabals mínims pot ésser útil en rius no regulats i en trams no modificats per l'home. S'aconsella implementar de forma paral·lela altres mètodes que incorporin indicadors de la qualitat biòtica, com per exemple els ecohidrològics o holístics.
8. El cabal mínim del tram inferior de l'Ebre obtingut pel mètode del perímetre mullat és gairebé idèntic a l'actualment proposat mitjançant metodologies més sofisticades. La dada pot ésser vàlida a l'hora de justificar noves propostes de cabals.
9. Cal que els organismes de conca disposin de competències i independència suficients per tal de defensar els sistemes fluvials i evitar la seva degradació extrema. La introducció de polítiques de règim ambiental ha d'ésser l'espina dorsal de nous projectes que regulin i/o modifiquin els règims naturals dels rius.
10. Les comparacions entre perfils transversals de 1863 i actuals no han pogut demostrar canvis generalitzats a les lleres. Es recomana ampliar l'anàlisi aigües avall dels embassaments. La hipòtesi és que en aquests punts la llera s'haurà incidit en el terreny i s'haurà estretit.
11. Cal que els criteris en la gestió dels cabals durant els estiatges tinguin ben present la qualitat dels rius com a sistemes biòtics fràgils, els quals requereixen una especial protecció.

8 BIBLIOGRAFIA

8.1 OBRES CITADES

Álvarez, M.; Barquín, J.; Recio, M. (2007). *El ecosistema fluvial en el alto Ebro. Estado de conservación de la comunidad de macroinvertebrados y del bosque de ribera como reflejo de los usos de la cuenca*. Asociación Locustella.

Centro de Estudios y de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). *Anuario de aforos 2006-2007*. [en línia]. Disponible a: <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>.
[Consulta: 10 juny 2010]

Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). (2006). *Plan hidrológico de la cabecera del Ebro hasta Quintanilla-Escalada*. Oficina de Planificación Hidrológica.

Chin, A.; i Wohl, A. (2005). Toward a theory for step pools in stream channels. *Progress in Physical Geography*. **29** (3), 275-296.

De Mesa Arroquia, P.A. (1865). *Reconocimiento hidrológico del valle del Ebro*. Junta General de Estadística, Madrid.

Directiva Marc de l'Aigua 2000/60/CE, per la que s'estableix un marc comunitari d'actuació en l'àmbit de la política d'aigües. DOCE I 327. (23-10-2000).

Dolz Ripollés, J.; Gómez Valentín, M.; Nieto Romeral, J. (1997). El Ebro en el Delta. *Revista de Obras Públicas*. **144** (3368), 7-14.

Fernández Rodríguez, F. (2008). *El origen del Ebro. Cuaderno de Bitácora Terrestre*. [en línia]. Disponible a <http://blogs.ya.com/felixfernandez/200802.htm>.
[Consulta: 10 juny 2010]

- Fischenich, C. (2001). *Stability thresholds for stream restoration materials*. EMRRP. [en línia]. Disponible a: <http://el.erdc.usace.army.mil/elpubs/pdf/sr29.pdf>. [Consulta: 10 juny 2010]
- Franquet Bernis, J.M. (2009). *El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro*. Eumed.net. [En línia]. Disponible a: www.eumed.net/libros/2009b/564/. [Consulta: 10 juny 2010]
- Galván Plaza, R. (2009). *El reconocimiento hidrológico del valle del Ebro efectuado por Pedro Antonio de Mesa en 1863*. CHE, Saragossa.
- Gippel C.J.; Stewardson, M.J. (1998). Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *Regulated rivers: research & management*. **14**, 53-67.
- Julien, P.Y.; Wargadalam, J. (1995). Alluvial Channel Geometry: Theory and Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*. **121** (44), 312-325.
- Knighton, A.D. (1999). Downstream variation in stream power. *Geomorphology*. **29**, 293-306.
- Nelson, L. USDA Forest Service/Montana Compact. *Montana's Official State Website*. [en línia]. Disponible a: http://dnrc.mt.gov/rwrcc/Compacts/usdacompact/wetted_perimeter.pdf. [Consulta: 10 juny 2010]
- Lee, C.-S; Tsai, L.L (2009). A quantitative analysis for geomorphic indices of longitudinal river profile. *Environmental Earth Sciences*. **59**, 1549-1558.
- Lee, J.S.; Julien, P.Y., (2006). Downstream Hydraulic Geometry of Alluvial Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. **132** (12), 1347-1352.
- Leopold, L.B. (1953). Downstream change of velocity in rivers. *American Journal of Science*. **251**, 606-624.
- Martín Vide, J.P., (2002). *Ingeniería de ríos*. Edicions UPC, Barcelona.
- Martínez Cobo, E., (2008). Biografía de don Pedro Antonio de Mesa Arroquia, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. *Elucidiario*. **5**, 215-223.
- Maza Álvarez, J.A.; García Flores, M. (1996). *Estabilidad de Cauces. Capítulo 12 del Manual de Ingeniería de Ríos*. Instituto de Ingeniería UNAM, Mèxic.
- Memoria sobre el reconocimiento hidrológico del valle del Ebro. (1865). *Revista de Obras Públicas*. **13**, tom I (18): 229-242.
- Morales, J.I.M.; Piqué, F.N.; González, L.U., (1995). Els estudis hidrològics de Pedro Antonio de Mesa (1862-1865). *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*. **40**, 33-41
- Ollero, A.; Sánchez, M.; Losada, J.A.; Hernández, C. (2004). *El comportamiento hídrico del río Ebro en su recorrido por Aragón*. Universidad de Zaragoza i Institución Fernando el Católico, Zaragoza.

- Palanques, A.; Guillén, J. (1992). Transporte de sedimentos en suspensión en la parte baja del río Ebro (Mediterráneo Occidental). Impacto ambiental de las presas. *Geogaceta*. **12**, 37-40.
- Palau A. (2007). Aspectos clave sobre los caudales de mantenimiento en la elaboración del
- Parker, G.; Wilcock, P.R.; Paola, C.; Dietrich, W.E.; Pitlick, J. (2007). Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers. *Journal of Geophysical Research*. **112**, 1-21.
- Parker, G.W.; Armstrong, D.S.; Richards, T.A. (2004). *Comparison of methods for determining streamflow requirements for aquatic habitat protection at selected sites on the Assabet and Charles Rivers, Eastern Massachusetts, 2000-02*. United States Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5092.
- Piñeiro, G.; Perelman, S.; Guerschman, J.P.; i Paruelo, J.M. (2008). How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed?. *Ecological Modelling*. **216**, 316-322.
- Real Decreto 1664/1998, de 24 de Julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de Cuenca. B.O.E. 191. (11-8-1998) 27296-27298.
- Rădoane, M.; Rădoane, N.; i Dumitriu, D., (2003). Geomorphological evolution of longitudinal river profiles in the Carpathians. *Geomorphology*. **50**, 293-306.
- Richter, B.D., (2008). *Watershed Academy Web*. United States Environmental Protection Agency (USEPA). [en línea]. Disponible a: <http://www.epa.gov/watertrain/river/right3.html>. [Consulta: 10 juny 2010]
- Sánchez-Arcilla, A.; Jiménez, J.A.; Gelonch, G.; Nieto Romeral, J. (1997). El problema erosivo en el Delta del Ebro. *Revista de Obras Públicas*. **144** (3368), 23-32.
- Sánchez, R.; i Ibáñez, C. (2007). *Criterios para la implantación de caudales ecológicos*. Unitat d'Ecosistemes Aquàtics de l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (UEA-IRTA).
- Sánchez, R.; i Ibáñez, C. (2008). *Estudis de valoració i determinació del règim de cabals ambientals al tram baix del riu Ebre al seu pas per Catalunya. Proposta de règim de cabals ambientals del tram final del riu Ebre i validació biològica preliminar*. Agència Catalana de l'Aigua (ACA) i UEA-IRTA.
- Sierra Álvarez, J. (1996). Una fuente para la geografía histórica de la industrialización española: los itinerarios fluviales, 1876-1881. *Ería: Revista cuatrimestral de geografía*. **39-40**, 74-82.

8.2 ALTRES REFERÈNCIES

- CHE. (2006). *Plan especial de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía en la cuenca hidrográfica del Ebro*. Oficina de Planificación Hidrológica.

CHE. *La cuenca. Datos básicos* [en línea]. Disponible a:

<http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2745&idMenu=2167>.

[Consulta: 10 juny 2010]

Fuhrman, D.R. (2009). *Lecture notes. Fluvial and marine sediment transport*. Danmarks Tekniske Universitet.

Guillén, J.; Díaz, J.I.; Palanques, A. (1992). Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo por el río Ebro al medio marino. *Revista Sociedad Geológica de España*, **5** (1-2), 27-38.

Goodwin, P. (2004). Analytical Solutions for Estimating Effective Discharge. *Journal of Hydraulic Engineering*. **130** (8), 729-738.

Jowett, I.G. (1997). Instream flow methods: a comparison of approaches. *Regulated rivers: research & management*. **13**, 115-127.

Monica, S. *Ponte na estrada para Alto Campoo nevada. Panoramio*. [en línea]. Disponible a: www.panoramio.com/photo/1988927.

[Consulta: 10 juny 2010]

Plan Hidrológico del Ebro. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo i Universidad de Lleida. [en línea]. Disponible a:

<http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/DirectivaMarco/ParticipacionCiudadana/7apalau-unilleida.pdf>.

[Consulta: 10 juny 2010]

Pujol, A.; Paterson, A. (2001) *Conceptual problems in the study of regime channels In fluvial hydraulics*. [en línea]. Disponible a:

<http://www.exa.unicen.edu.ar/fluidos/dfyp/Fluidos2001/Datos/Contenido/Posters/Pujol.pdf>.

[Consulta: 10 juny 2010]

Shu-You, C.; Knight, D.W. (2002). *Review of Regime Theory of alluvial channels*. *Journal of Hydrodynamics*. **3**, 1-7.

Rice, S.P.; i Church, M., (2001). Longitudinal profiles in simple alluvial systems. *Water Resources Research*. **37** (2), 417-426.

ANNEX A. AMPLIACIÓ TEÒRICA A LA FORMULACIÓ DE LEE I JULIEN (2006)

La formulació de Lee i Julien que es presenta a l'apartat 5.6 es basa en els estudis previs de Julien i Wargadalam (1995), que van derivar relacions semiteòriques per a la geometria fluvial. Combinaven quatre equacions fonamentals: cabal, resistència al flux, mobilitat del material de la llera i corrents secundaris en corbes.

1. **Cabal.** Sota règim permanent i uniforme en condicions de llera plena, el cabal dominant es defineix com:

$$Q = B \cdot y_m \cdot v_m \quad [A1]$$

2. **Resistència al flux.** La resistència al flux en la forma potencial proposta per Einstein i Chien (1954) és:

$$v_m = \alpha \cdot \sqrt{g} \cdot \left(\frac{y_m}{d_{50}} \right)^m \cdot y_m^{1/2} \cdot S^{1/2} \quad [A2]$$

On:

$$m = \frac{1}{\ln \left(\frac{12.2 \cdot y_m}{d_{50}} \right)} \quad [A3]$$

α variable adimensional per calibrar.

g acceleració gravitatòria igual a 9.81 m/s²

3. **Mobilitat del material de la llera.** L'estabilitat de les partícules no cohesives en una llera rectilínia es descriu pel ràtio entre les forces de fricció (turbulència) i les forces gravitacionals. En el paràmetre de Shields θ aquesta relació queda palesa de la forma:

$$\theta = \frac{y_m \cdot S}{(s - 1) \cdot d_{50}} \quad [A4]$$

Que utilitza l'aproximació de rius de llera ampla (quocient B/y és força gran) on el radi hidràulic es pot substituir pel calat mitjà.

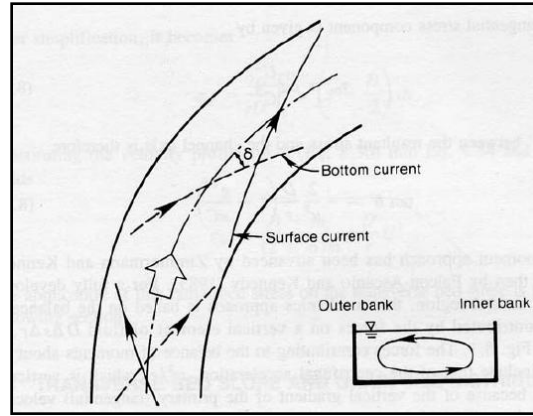


Figura A1. Representació simplificada del moviment helicoidal en la circulació en corbes. Font: apunts de l'assignatura "Fluvial and marine sediment transport" (Danmarks Tekniske Universitet).

4. **Corrents secundaris en corbes.** A partir de la circulació en corbes i els corrents secundaris, també conegut com *moviment helicoidal* (Figura A1), s'arriba a la següent expressió:

$$\tan \delta = b_r \cdot \left(\frac{y_m}{d_{50}} \right)^{2 \cdot m} \cdot \frac{y_m}{B} \quad [A5]$$

Essent b_r un paràmetre que s'assumeix constant i que es defineix com:

$$b_r = \frac{\alpha^2 \cdot B}{\Omega_r \cdot R} \quad [A6]$$

On:

- δ angle de desviació de les línies de corrent prop del llit de la llera respecte de la direcció longitudinal degut al component transversal (radial) de la velocitat (rad)
- Ω_r ràtio de les forces centrífugues que generen corrents secundaris amb l'esforç tallant que disminueix el moviment i dissipa energia (-)
- R radi de curvatura (m)

De tot aquest conjunt de variables: B , y_m , v_m , S , Q , d_{50} , θ , $\tan \delta$, α , b_r , s i m , Julien (1988) va limitar a Q , d_{50} i θ la llista de principals variables independents (la variació de la resta de variables es considera relativament petita). A més, quatre relacions permeten la definició de quatre variables dependents: B , y_m , v_m i S essent Wargadalam (1995) qui va aproximar valors empírics per a la resta de variables. Finalment, en el treball conjunt de Julien i Wargadalam (1995) es presenten les equacions de la geometria hidràulica en equilibri escrites com a funcions potencials del cabal Q , la mida del material de la llera representat per d_{50} i el paràmetre de Shields θ .

ANNEX B. INDICADORS ESTADÍSTICS

L'anàlisi estadística dels models s'ha avaluat seguint els consells de Piñeiro *et al.* Els indicadors estadístics i la seva definició que apareixen al llarg del present treball es citen a continuació, on *REA* indica els valors reals (obtinguts del *Reconocimiento hidrológico del valle del Ebro*), *PRE* són els corresponents valors que les diferents formulacions aboquen, *EST* són els valors que estimen les rectes de regressió calculades per a cada variable i model seguit, i *n* és el nombre d'aforaments considerat i que pot variar per a cada cas (amb un màxim de 148).

- I. Mitjana matemàtica geomètrica:

Unitats: les mateixes que *REA*.

[B1]

$$\overline{REA}_g = \sqrt[n]{REA_1 \cdot REA_2 \cdot \dots \cdot REA_n}$$

- II. Mitjana matemàtica aritmètica:

Unitats: les mateixes que *REA*.

[B2]

$$\overline{REA}_a = \frac{\sum_n REA_i}{n}$$

- III. Desviació quadràtica mitjana relativa (DQMR):

Unitats: %.

[B3]

$$DMQR = \frac{\sqrt{\frac{\sum_n (PRE_i - REA_i)^2}{n}}}{\overline{REA}_g} \cdot 100$$

- IV. Error relatiu (*ER*):

Unitats: %.

[B4]

$$ER = \frac{REA_i - PRE_i}{REA_i} \cdot 100$$

- V. Coeficient de determinació (r^2):

Unitats: adimensional.

[B5]

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_n (REA_i - EST_i)^2}{\sum_n (REA_i - \overline{REA})^2}$$

Com més proper a 1 és r^2 millor s'ajusten els valors reals a l'equació de la regressió calculada. També indica la proporció de la variància en els valors reals que és explicada pels valors predits.

VI. Coeficient de Desigualtat de Theil (U):

Unitats: adimensional. Valors entre 0 i 1.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{\sum_n (REA_i - PRE_i)^2}{n}}}{\sqrt{\frac{\sum_n PRE_i^2}{n} + \sqrt{\frac{\sum_n REA_i^2}{n}}}} \quad [B6]$$

Si $U = 0$ els valors reals i els valors predits coincideixen sempre; si $U = 1$ no hi ha cap tipus de convergència. Aquest coeficient pot ésser descompost en tres proporcions de desigualtat:

- Proporció associada a la desviació mitjana entre els valors observats i els predits:

Unitats: adimensional. Valors entre 0 i 1.

$$U_b = \frac{n(\overline{REA}_o - \overline{PRE}_o)^2}{\sum_n (REA_i - PRE_i)^2} \quad [B7]$$

- Proporció associada amb el pendent (β) de la recta de regressió del model i la recta identitat:

Unitats: adimensional. Valors entre 0 i 1.

$$U_{\beta-1} = \frac{(\beta - 1)^2 \cdot \sum_n (PRE_i - \overline{PRE}_o)^2}{\sum_n (REA_i - PRE_i)^2} \quad [B8]$$

- Proporció associada amb la variància no explicada:

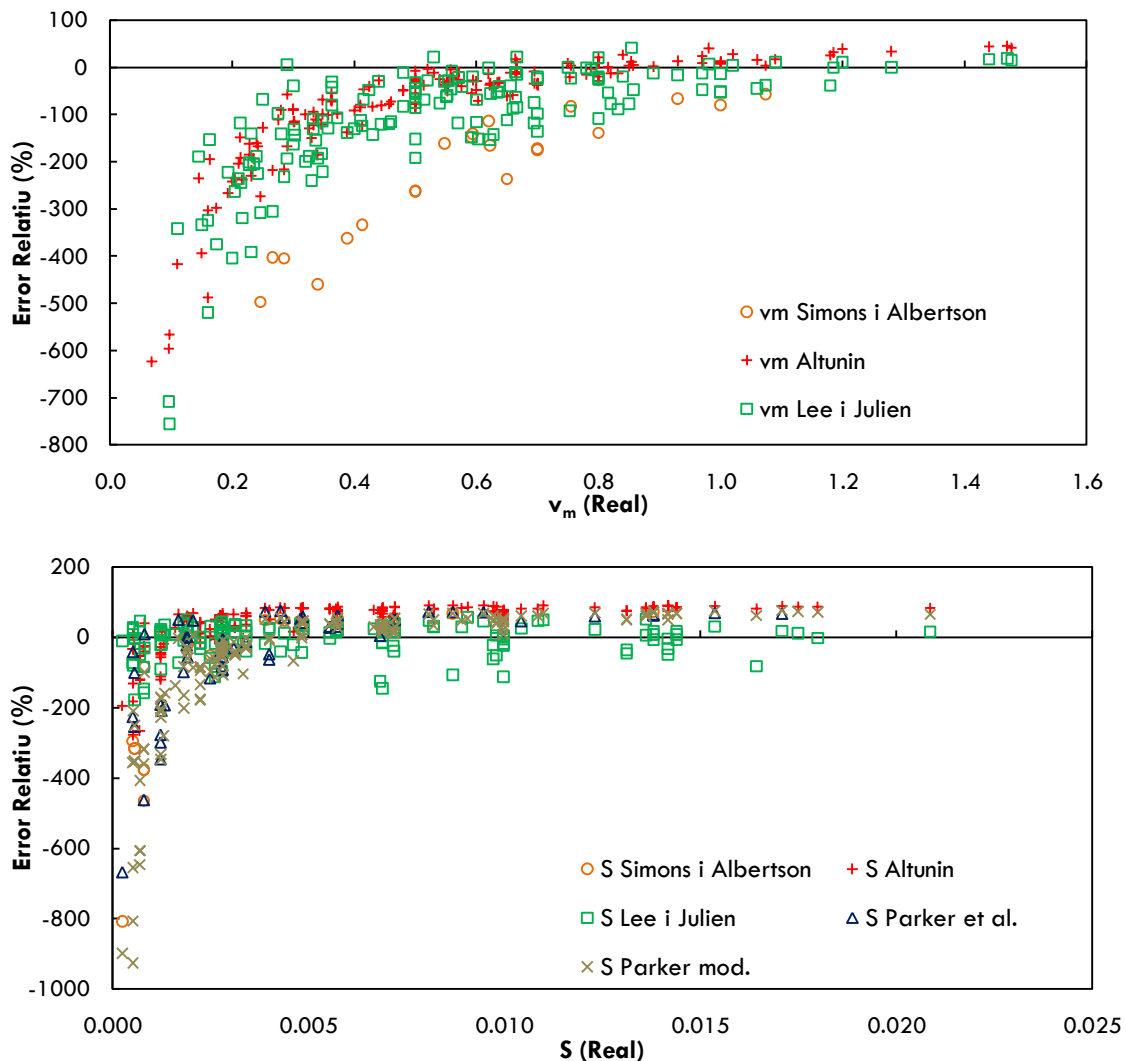
Unitats: adimensional. Valors entre 0 i 1.

$$U_e = \frac{\sum_n (EST_i - REA_i)^2}{\sum_n (REA_i - PRE_i)^2} \quad [B9]$$

Les tres proporcions compleixen $U_b + U_{\beta-1} + U_e = 1$. El més favorable pel model és que U_e sigui la major.

ANNEX C. GRÀFIQUES $ER-v_m$ I $ER-S$

A continuació es mostren les gràfiques corresponents a l'evolució de l'error relatiu de la velocitat mitjana v_m i del pendent S segons quina ha estat la formulació emprada.



A La gràfica de v_m tots els errors relatius de les prediccions són molt grans per a mesures de v_m petites. A mesura que v_m augmenta, l'error relatiu disminueix de manera logarítmica per a Altunin i Lee i Julien, i de forma lineal per a Simons i Albertson.

La gràfica d' S demostra que els errors relatius comesos per Lee i Julien són els més petits. La resta de mètodes introdueixen un error relatiu molt gran per a magnituds d' S petites que es redueix i sembla mantindre's constant per a magnituds majors.

Els desenvolupament dels resultats es pot trobar a l'apartat 5.9.12.

ANNEX D. MAGNITUDS DE LES VARIABLES DELS AFORAMENTS

Dels 231 aforaments que D. Pedro Antonio cita en la memòria, es mostren les dades dels 129 que n'especifica les dimensions del perfil transversal i proporciona una mesura de la velocitat mitjana. Tota la informació està resumida a 4.7 i 4.8.

Taula D1. Valors de les variables dels 129 aforaments complerts practicats per D. Pedro Antonio durant l'estiatge del 1863. S'especifica el número corresponent a la numeració de la memòria, el nom, de quin riu és tributari, l'amplada B (m), l'àrea mullada A (m²), el calat màxim y (m), la velocitat mitjana v_m (m/s), el pendent S (-), i la mida del material de la llera d₅₀ (m) (segons els estudis complementaris). Font: elaboració pròpia a partir de Mesa Arroquia (1863).

Número	Nom	Desemboca a	B	A	y	v _m	S	d ₅₀
1	Trisuerra	Híjar-Ebre	5.31	2.00	0.56	0.41	0.09283	0.040
2	Mazandrero	Híjar-Ebre	9.25	3.51	0.60	0.43	0.00998	0.040
3	Híjar (Ebre)	Ebre	15.30	6.68	0.76	0.33	0.00998	0.040
4	Villar	Ebre	1.50	0.17	0.17	0.44	0.00998	0.040
5	Planchada	Ebre	1.80	0.80	0.53	0.24	0.00998	0.040
6	Parralozas	Ebre	3.60	0.35	0.15	0.07	0.00998	0.040
7	Cruceo	Ebre	5.50	1.30	0.33	0.48	0.00998	0.040
8	Fontibre	Ebre	7.50	2.15	0.47	0.60	0.00998	0.040
9	Fontibre	Ebre	11.00	4.51	0.72	0.29	0.00482	0.040
10.1(a)	Híjar (Ebre)	Ebre	19.00	4.00	0.37	0.64	0.00482	0.040
10.2(b)	Híjar (Ebre)	Ebre	19.00	4.09	0.34	0.62	0.00482	0.040
10.3(c)	Híjar (Ebre)	Ebre	17.00	4.02	0.35	0.63	0.00482	0.040
11	Izarilla	Ebre	7.00	1.61	0.40	0.16	0.00718	0.040
12	Virga	Ebre	10.00	1.84	0.28	0.36	0.00717	0.040
13	Ebre	Ebre	24.80	17.58	1.15	0.29	0.00249	0.040
14	Polla	Ebre	4.00	0.88	0.33	0.21	0.01313	0.040
15	Polla	Ebre	4.80	1.07	0.34	0.24	0.01313	0.040
16	Mardanchos	Ebre	3.20	0.32	0.17	0.35	0.02087	0.040
17	Arrocastro	Ebre	2.80	0.45	0.25	0.36	0.00333	0.040
18	Ebre	Ebre	25.00	24.07	1.37	0.25	0.00279	0.040
19	Rudrón	Ebre	11.20	10.66	1.42	0.27	0.00683	0.040
20	Omino	Ebre	7.80	2.37	0.45	0.82	0.01750	0.040
21	Nela	Ebre	9.35	2.51	0.45	0.79	0.00313	0.040
22.11(d)	Nela	Ebre	14.80	3.07	0.35	0.58	0.00313	0.040
22.22(e)	Nela	Ebre	20.00	4.41	0.32	0.64	0.00313	0.040
23	Gerta	Ebre	6.00	1.14	0.28	0.85	0.00069	0.040
24	Ebre	Ebre	29.00	15.99	0.90	1.07	0.00574	0.040
25	Omecillo	Ebre	7.80	3.50	0.74	0.23	0.00123	0.040

26	Oroncillo	Ebre	8.00	1.37	0.24	0.48	0.00123	0.040
27(f)	Ebre	Ebre	11.00	6.13	0.60	0.78	0.00123	0.040
27.01(g)	Ebre	Ebre	34.00	20.65	0.84	0.80	0.00123	0.040
27.11(d)	Ebre	Ebre	29.00	11.15	0.62	0.70	0.00123	0.040
27.22(e)	Ebre	Ebre	23.50	9.49	0.60	0.70	0.00123	0.040
28	Bayas	Ebre	8.50	1.68	0.34	0.28	0.00181	0.025
28.8(h)	Bayas	Ebre	6.20	0.98	0.24	0.21	0.00181	0.025
29	Zadorra	Ebre	21.00	5.81	0.45	0.15	0.00224	0.040
30	Zadorra	Ebre	10.30	2.47	0.40	0.36	0.00224	0.025
31	Ayuda	Zadorra	4.20	0.55	0.21	0.16	0.00224	0.025
32	Ayuda	Zadorra	4.50	0.66	0.24	0.15	0.00224	0.025
33	Ayuda	Zadorra	11.50	3.73	0.47	0.33	0.00224	0.025
34	Ayuda	Zadorra	13.00	4.17	0.52	0.30	0.00224	0.025
35	Zadorra	Ebre	31.00	9.23	0.47	0.24	0.00160	0.025
36	Inglares	Ebre	2.60	0.57	0.24	0.23	0.01418	0.040
37.11(d)	Inglares	Ebre	2.00	0.51	0.30	0.98	0.01418	0.025
37.22(e)	Inglares	Ebre	2.30	0.98	0.47	0.84	0.01418	0.025
38	Glera	Ebre	19.60	4.37	0.36	0.55	0.00341	0.040
39	sèquia Molinacho	Glera	5.30	1.78	0.38	0.42	0.00341	0.025
39.11(d)	Glera	Ebre	8.70	2.20	0.43	0.50	0.00341	0.025
39.22(e)	Glera	Ebre	11.70	3.93	0.61	1.02	0.00341	0.025
40	Najerilla	Ebre	12.50	3.00	0.39	0.40	0.00721	0.040
41	Najerilla	Ebre	26.00	7.05	0.69	0.70	0.00721	0.025
42	Najerilla	Ebre	16.00	5.55	0.57	0.66	0.00570	0.025
43	Ebre	Ebre	71.80	62.33	1.60	0.50	0.00025	0.025
44	Iregua	Ebre	6.90	3.28	0.57	0.35	0.00972	0.040
45	Iregua	Ebre	15.00	6.51	0.74	0.35	0.00972	0.025
46	Leza	Ebre	21.50	3.55	0.26	0.11	0.00130	0.025
47	Ebre	Ebre	87.00	60.33	1.24	0.50	0.00192	0.025
48	Ega	Ebre	1.50	0.21	0.19	0.36	0.00462	0.040
49	Ega	Ebre	7.40	4.69	1.07	0.76	0.00309	0.025
50	Ega	Ebre	12.20	2.71	0.38	0.75	0.00206	0.025
51	Urederra	Ega	6.00	2.98	0.58	0.19	0.00261	0.040
52	Urederra	Ega	11.30	5.23	0.69	0.21	0.00261	0.025
53	Urederra	Ega	5.45	1.43	0.39	0.42	0.00261	0.025
54	Aragón	Ebre	75.00	19.10	0.40	0.44	0.00192	0.025
55	Aragón	Ebre	48.60	12.15	0.40	0.41	0.00181	0.025
56	Aragón	Ebre	37.00	13.43	0.53	0.33	0.00275	0.025
57	Aragón	Ebre	22.80	5.78	0.46	0.66	0.00275	0.025
58	Arga	Aragón	21.50	4.13	0.26	0.80	0.00070	0.025
59	Arga	Aragón	34.00	13.04	0.65	0.17	0.00278	0.025
60	Arga	Aragón	41.30	16.69	0.66	0.22	0.00278	0.025
61	Arga	Aragón	28.60	6.16	0.32	0.55	0.00278	0.025
62	Arga	Aragón	20.00	4.19	0.43	0.30	0.00278	0.025
63	Arga	Aragón	12.50	1.63	0.22	0.57	0.00278	0.025
64	Arga	Aragón	17.00	4.89	0.43	0.23	0.01800	0.040
65	Ulzama	Arga	2.95	2.07	0.70	0.20	0.00689	0.040

66	Larraun	Arga	5.90	1.21	0.33	0.23	0.00717	0.040
67	Larraun	Arga	7.80	1.95	0.40	0.30	0.00689	0.040
68	Lecumberri	Larraun	7.70	1.91	0.35	0.80	0.00689	0.040
69	Larraun	Arga	26.40	10.18	0.62	0.20	0.00689	0.025
70.1(a)	Robo	Arga	4.80	0.49	0.21	0.50	0.00689	0.025
70.2(b)	Robo	Arga	4.50	0.46	0.15	0.52	0.00689	0.025
71.1(a)	Salado	Arga	5.60	1.31	0.41	0.30	0.00070	0.025
71.2(b)	Salado	Arga	5.90	1.57	0.44	0.25	0.00070	0.025
72	Irati	Aragón	13.50	4.31	0.51	0.46	0.00689	0.040
73	Urrobi	Irati	8.00	2.67	0.40	0.10	0.01644	0.040
74	Irati	Aragón	22.70	8.57	0.58	0.50	0.01709	0.040
75	Salazar	Irati	13.00	3.63	0.46	0.10	0.00980	0.040
76	Salazar	Irati	11.00	1.71	0.25	0.34	0.00980	0.040
77	Salazar	Irati	7.40	1.75	0.34	0.50	0.00980	0.025
78	Irati	Aragón	41.00	10.57	0.48	0.37	0.00133	0.025
79	Irati	Aragón	25.50	12.24	0.82	0.33	0.00125	0.025
80	Esca	Aragón	14.50	2.55	0.39	0.50	0.00250	0.040
81	Alhama	Ebre	6.10	0.92	0.18	0.56	0.00891	0.025
82.1(a)	Queiles	Ebre	4.00	1.29	0.45	1.47	0.01440	0.040
82.2(b)	Queiles	Ebre	4.30	1.32	0.39	1.44	0.01440	0.040
82.3(c)	Queiles	Ebre	4.00	1.60	0.56	1.19	0.01440	0.040
83	Ebre	Ebre	83.00	133.04	2.95	0.34	0.00052	0.025
84	Piedra	Jalón	5.40	4.22	0.96	0.62	0.00080	0.025
85	Giloca	Jalón	6.90	2.99	0.52	1.20	0.00554	0.025
86	Giloca	Jalón	11.40	4.14	0.49	0.97	0.00554	0.025
87	Manubles	Jalón	5.00	0.79	0.20	0.67	0.00667	0.025
88	Jalón	Ebre	13.80	9.37	1.16	0.93	0.00281	0.025
89	Jalón	Ebre	16.00	5.45	0.75	0.51	0.00281	0.025
90.1(a)	Canal de Tauste	Ebre	4.50	8.79	2.10	0.55	0.00080	0.025
90.2(b)	Canal de Tauste	Ebre	4.50	8.10	1.93	0.59	0.00080	0.025
91.1(a)	Ebre	Ebre	89.00	68.56	1.18	0.41	0.00056	0.025
91.2(b)	Ebre	Ebre	94.00	73.02	1.26	0.39	0.00056	0.025
92	Gállego	Ebre	40.00	12.44	0.53	0.85	0.00947	0.025
93	Gállego	Ebre	40.80	17.71	0.79	1.00	0.00189	0.025
94	Gállego	Ebre	38.00	19.77	0.69	0.46	0.00189	0.015
95	Segre	Ebre	12.60	2.25	0.29	1.28	0.01361	0.040
96	Raur	Segre	4.00	0.96	0.28	0.80	0.01361	0.040
97	Segre	Ebre	11.40	2.39	0.36	1.48	0.01086	0.040
98	Segre	Ebre	21.80	7.11	0.49	0.60	0.01043	0.040
99	Segre	Ebre	17.80	7.09	0.48	0.75	0.01381	0.040
100	Segre	Ebre	20.00	9.65	0.70	0.70	0.01381	0.040
101	Segre	Ebre	18.00	9.71	0.89	0.59	0.01381	0.040
102	Balira	Segre	19.00	7.54	0.53	0.82	0.01231	0.040
103	Segre	Ebre	35.00	19.69	0.76	1.06	0.00575	0.025
104	Salado	Segre	15.20	2.47	0.40	0.50	0.00575	0.025
105	Noguera Pallaresa	Segre	40.00	29.00	1.14	1.00	0.00439	0.025
106	Segre	Ebre	76.00	39.88	0.79	0.63	0.00486	0.025

107	Noguera Ribagorçana	Segre	26.90	11.45	0.69	0.86	0.00486	0.025
108	Cinca	Segre	41.00	58.86	1.85	0.80	0.00429	0.015
109	Segre	Ebre	71.50	153.00	3.25	0.60	0.00168	0.015
110	Balira	Segre	23.50	8.45	0.69	0.83	0.01538	0.040
111	Noguera Ribagorçana	Segre	13.40	23.66	2.10	0.62	0.00869	0.025
112	Noguera Ribagorçana	Segre	48.90	24.52	0.79	1.00	0.00486	0.025
113	Cinca	Segre	43.00	19.16	0.60	0.97	0.00480	0.025
114	Cinca	Segre	60.00	71.56	1.95	0.70	0.00389	0.015
115	Cinca	Segre	86.30	65.33	1.35	0.70	0.00206	0.015
116.11(d)	Ara	Cinca	14.50	4.25	0.62	0.89	0.00400	0.040
116.22(e)	Ara	Cinca	19.00	5.28	0.48	0.54	0.00400	0.040
117	Ara	Cinca	23.30	7.94	0.53	0.67	0.00720	0.025
118	Natas	Cinca	6.80	1.00	0.20	0.53	0.00052	0.025
119	Ésera	Cinca	42.50	16.33	0.60	1.18	0.00807	0.025
120	Rialgo	Cinca	12.60	2.59	0.39	0.67	0.00052	0.025
121.11(d)	Isabena	Cinca	5.00	0.79	0.31	0.56	0.00281	0.040
121.22(e)	Isabena	Cinca	14.00	4.55	0.45	1.09	0.00281	0.040
121.33(i)	Isabena	Cinca	4.60	1.83	0.48	0.55	0.00281	0.040
122	Alcanadre	Cinca	30.00	3.52	0.17	0.32	0.00906	0.025
123	Guadalope	Ebre	29.50	5.76	0.32	0.57	0.01100	0.025
124	Algas	Mataraya	2.70	0.23	0.14	0.29	0.00052	0.015
125	Nonaspe	Mataraya	7.50	0.78	0.15	0.28	0.00820	0.025
126	Matarranya	Ebre	4.00	0.50	0.18	0.66	0.00820	0.015
127	Ebre	Ebre	102.00	256.85	4.30	0.16	0.00056	0.015
128	Ebre	Ebre	118.00	208.76	2.80	0.65	0.00081	0.015
129	Ebre	Ebre	84.00	206.09	3.63	0.66	0.00052	0.015
Mitjana Geomètrica		Vall de l'Ebre	13.32	4.42	0.51	0.47	0.00416	0.030
		Regió Superior	9.33	2.75	0.45	0.42	0.00498	0.040
		Regió Mitja	11.70	3.67	0.48	0.41	0.00338	0.029
		Regió Inferior	22.39	9.09	0.63	0.67	0.00426	0.026

(a) Secció transversal d'aigües amunt.

(b) Secció transversal d'aigües avall.

(c) Secció transversal del centre.

(d) Secció transversal corresponent al braç de la dreta (mirant cap a aigües avall).

(e) Secció transversal corresponent al braç de l'esquerre (mirant cap a aigües avall).

(f) Canal que s'incorpora a l'Ebre a Miranda de Ebro.

(g) Secció transversal de l'Ebre a Miranda de Ebro un cop els dos braços s'ajunten.

(h) Mateix aforament al Bayas però en diferents circumstàncies.

(i) Aforament corresponent al Naixement de San Cristóbal.

ANNEX E. LOCALITZACIÓ DELS AFORAMENTS

Molts pobles i localitzacions, algunes avui en dia irreconeixibles, van rebre la visita de l'equip amb D. Pedro Antonio al capdavant, durant la travessia que els va dur a recórrer al voltant de 4000 km.

A continuació s'especifica la localització dels 129 aforaments que han estat la base d'elaboració d'aquest treball. El dibuix de cadascuna de les seccions transversals es pot veure a l'Annex F.

Taula E1. Localització aproximada de 129 aforaments realitzats per D. Pedro Antonio durant l'estiatge de 1863. Font: elaboració pròpia a partir de Mesa Arroquia (1863) i Galván Plaza (2009).

Número	Nom	Localització
1	Trisuerra	50 m aigües amunt de la confluència amb el Mazandrero al pont de Riaño
2	Mazandrero	200 m aigües amunt de la unió amb el Trisuerra
3	Híjar (Ebre)	2 km Pont de Villar
4	Villar	Desembocadura en l'Ebre a Reinoso
5	Planchada	Desembocadura en l'Ebre aigües avall de l'anterior
6	Parralozas	Desembocadura en l'Ebre per sota de Naveda
7	Cruceo	Desembocadura en l'Ebre per sota de Paracuellos
8	Fontibre	Naixement
9	Fontibre	Reinoso
10	Híjar (Ebre)	Abans de la confluència amb el Fontibre
11	Izarilla	Confluència amb l'Ebre
12	Virga	Aigües avall de la confluència amb el Pinadero
13	Ebre	Bárcena de Ebro
14	Polla	2 km aigües avall dels Carabeos
15	Polla	Desembocadura en l'Ebre a Bárcena
16	Mardanchos	Desembocadura en l'Ebre a Villanueva la Nía
17	Arrocastro	Desembocadura en l'Ebre a 1 km de Mardanchos
18	Ebre	San Martín de Helines
19	Rudrón	Desembocadura en l'Ebre a 1 km per sota de Val de la Teja
20	Homino (Mayor)	Desembocadura en l'Ebre
21	Nela	Vado
22	Nela	Pont Moneo
23	Gerta	Desembocadura en l'Ebre a Palazuelos
24	Ebre	Pangusión
25	Omecillo	Desembocadura en l'Ebre
26	Oroncillo	Desembocadura en l'Ebre
27	Ebre	Miranda de Ebro
28	Bayas	Desembocadura en l'Ebre

29	Zadorra	Nanclares
30	Zadorra	A Corzano, aigües amunt de la desembocadura de l'Ayuda
31	Ayuda	Pariza
32	Ayuda	aigües amunt de la confluència del Treviño
33	Ayuda	Baños de Cucho
34	Ayuda	Desembocadura en el Zadorra
35	Zadorra	Desembocadura en l'Ebre
36	Inglares	Pipaon a 5 km de l'origen
37	Inglares	Desembocadura en l'Ebre
38	Glera	Ezcaray
39	Glera	A Haro a prop de la desembocadura en l'Ebre
40	Najerilla	aigües avall de Mansilla
41	Najerilla	Nájera
42	Najerilla	Desembocadura en l'Ebre a Torremontalvo
43	Ebre	Logroño
44	Iregua	Pradillo
45	Iregua	Presa de Islallana
46	Leza	Desembocadura en l'Ebre
47	Ebre	Calahorra
48	Ega	Naixement a Lagran
49	Ega	aigües amunt de la desembocadura del Urederra
50	Ega	Desembocadura en l'Ebre, aigües avall d'Andosilla
51	Urederra	Barindano
52	Urederra	Artabia
53	Urederra	Desembocadura en l'Ega
54	Aragón	Desembocadura en l'Ebre a Milagro
55	Aragón	Sobre confluència de l'Arga
56	Aragón	A Liédena, aigües amunt de la confluència amb l'Irati
57	Aragón	A Esco, aigües amunt de la confluència amb l'Esca
58	Arga	Confluència amb Aragón
59	Arga	Miranda de Navarra
60	Arga	A Mendigorria, aigües amunt del Salado
61	Arga	A Puente la Reina, aigües amunt del Robo
62	Arga	Sobre la confluència del Larraun
63	Arga	A Pamplona, aigües avall de la confluència de l'Ulzama
64	Arga	Zubiri
65	Ulzama	En desembocadura a l'Arga (sèquia de Villaba)
66	Larraun	Entre Arbazu i Lacunza
67	Larraun	A Irurzun, aigües amunt de la confluència del Lecumberri
68	Lecumberri	Desembocadura en el Larraun
69	Larraun	Desembocadura en l'Arga
70	Robo	Desembocadura en l'Arga
71	Salado	Desembocadura en l'Arga a Mendigorria
72	Irati	Arive
73	Urrobi	Burguete
74	Irati	Confluència amb l'Urrobi
75	Salazar	A Ochagavía, abans de la confluència del Anduña

76	Salazar	Guesa
77	Salazar	Lumbier abans de la confluència de l'Irati
78	Irati	Abans de la confluència amb el Salazar
79	Irati	Després incorporar-se el Salazar
80	Esca	Desembocadura en l'Aragón
81	Alhama	Fitero
82	Queiles	Vozmediano
83	Ebre	Tudela
84	Piedra	Cimballa
85	Giloca	Daroca
86	Giloca	Paracuellos
87	Manubles	Desembocadura en el Jalón
88	Jalón	Calatayud
89	Jalón	Desembocadura en l'Ebre
90	Canal de Tauste	Cabanillas
91	Ebre	Saragossa
92	Gállego	Anzánigo
93	Gállego	Zuera
94	Gállego	Desembocadura en l'Ebre
95	Segre	Frontera francesa, aigües amunt del Raur
96	Raur	Confluència amb el Segre
97	Segre	Per sota de la desembocadura del Raur
98	Segre	Per sota de la desembocadura del Isobol
99	Segre	Per sobre de Martinet
100	Segre	Per sobre de la presa de la Seu d'Urgell
101	Segre	3 km aigües amunt de la Seu d'Urgell
102	Balira	Desembocadura en el Segre
103	Segre	A l'estret dels Trespunts
104	Salado	Confluència amb el Segre
105	Noguera Pallaresa	Tremp
106	Segre	Aigües amunt de la desembocadura del Noguera Ribagorçana
107	Noguera Ribagorçana	Desembocadura en el Segre
108	Cinca	Desembocadura en el Segre
109	Segre	Desembocadura en l'Ebre
110	Balira	San Julián de Andorra
111	Noguera Ribagorçana	Aren
112	Noguera Ribagorçana	Pont de Montanyana
113	Cinca	Aigües amunt de la desembocadura de l'Ara
114	Cinca	Aigües avall de la confluència del Ésera en Estada
115	Cinca	Monzón
116	Ara	Fiscal
117	Ara	Ainsa
118	Natas	Desembocadura en el Cinca
119	Ésera	Campó
120	Rialgo	Desembocadura en el Cinca
121	Isábena	Aigües avall de Biescas
122	Alcanadre	Pont penjant de la carretera de Huesca

123	Guadalope	Alcañiz
124	Algas	Aigües amunt de la seva desembocadura
125	Nonaspe	Abans de la seva confluència
126	Matarranya	Per sota de la confluència de l'Algas
127	Ebre	A Mequinensa, aigües amunt de la desembocadura del Segre
128	Ebre	A Mequinensa, aigües avall de la desembocadura del Segre
129	Ebre	Per sota de tots els seus afluents a Flix

ANNEX F. PERFILS TRANSVERSALS

La digitalització de les dades dels aforaments permet la representació gràfica de totes les seccions transversals dibuixades per D. Pedro Antonio i que han estat avaluades en el present treball.

Es mostren els 129 aforaments, la numeració dels quals és la mateixa que la que apareix en la memòria. Per a obtenir una informació completa, consultar dades en els annexos D i E. Abans es mostra una fotografia del suposat origen de l'Ebre segons D. Pedro Antonio.



Figura F1. Confluència del Trisuerra i Mazandrero aigües amunt del pont de Riaño. Aquest és l'origen de l'Híjar-Ebre per D. Pedro Antonio. Actualment, la toponímia ha canviat i es considera que el riu Híjar neix al Peña Labra, uns 10 km aigües amunt d'aquest punt. Font: fotografia extreta de www.panoramio.com.

